



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ
ΜΕΘΟΔΩΝ (ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΟ – ΥΠΕΡΗΧΟΙ)**



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΠΕΡΔΙΚΑΡΗΣ Φ.

ΕΚΠΟΝΗΤΕΣ
ΦΩΤΑΚΟΠΟΥΛΟΣ Θ.
ΜΑΜΑΛΟΥΔΗΣ Χ.

Βόλος, 2010



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 9024/1
Ημερ. Εισ.: 27-10-2010
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ
2010
MAM

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1. Γενικά.....	5
1.2. Διεθνείς – Ελληνικοί Οργανισμοί Μη-Καταστροφικών Μεθόδων.....	6
1.3. Εφαρμογές Μη-Καταστροφικών Μεθόδων.....	9
1.4. Μη-Καταστροφικές Μέθοδοι στο Σκυρόδεμα.....	10
2. ΕΙΔΗ ΜΗ-ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	
2.1. Οπτικές Μέθοδοι.....	15
2.1.1. Οπτικός Έλεγχος.....	15
2.1.2. Οπτικός Έλεγχος με Μικροσκόπιο.....	21
2.1.3. Οπτικός Έλεγχος με Βιντεοσκόπηση.....	21
2.2. Επιφανειακές Μέθοδοι.....	22
2.2.1. Σκληρότητα Επιφάνειας.....	22
2.2.1.1. Διεισδυτικές Μέθοδοι.....	22
2.2.1.2. Κρουσίμετρο Αναπήδησης Schmidt.....	22
2.2.1.3. Pullout Test.....	22
2.2.1.4. Μέτρηση Βάθους Ενανθράκωσης.....	23
2.2.2. Απορρόφηση – Διείσδυση Υγρών.....	25
2.2.2.1. Επιφανειακή Απορρόφηση Νερού.....	25
2.2.2.2. Μέθοδος Διεισδυτικών Υγρών.....	25
2.3. Μέθοδοι Δόνησης και Συντονισμού.....	26
2.3.1. Διαμήκης Καμπτικός και Στρεπτικός Συντονισμός.....	26
2.3.2. Μέτρηση της Απόσβεσης.....	28
2.4. Μέθοδοι Παλμικής Διάδοσης.....	28
2.4.1. Κύματα Αιφνίδιας Διαταραχής.....	28
2.4.2. Μέθοδοι Υπερήχων.....	29
2.5. Ραδιογραφικές Μέθοδοι.....	30
2.5.1. Ακτίνες Χ.....	30
2.5.2. Ακτίνες γ.....	30
2.5.3. Μέθοδος Μαγνητικών Σωματιδίων.....	32

2.6. Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι.....	33
2.6.1. Ηλεκτρικές Μέθοδοι.....	33
2.6.1.1. Μέθοδος Πτώσης Δυναμικού.....	33
2.6.1.2. Ρεύματα Eddy.....	35
2.6.2. Μαγνητικές Μέθοδοι.....	37
2.6.2.1. Ελεγχόμενα Μαγνητικά Ρινίδια.....	37
2.6.2.2. Μαγνητογραφία.....	38
2.6.2.3. Εντοπισμός Απωλειών Μαγνητικής Ροής.....	39
2.6.2.4. Έλεγχος Θορύβου Barkhausen.....	39
2.7. Θερμικές Μέθοδοι.....	40
2.7.1. Μέθοδος Θερμικών Εκπομπών.....	40
2.7.2. Θερμογραφική Μέθοδος.....	40
2.8. Μέθοδοι Διάδοσης Τασικών Κυμάτων.....	41
2.8.1. Έλεγχος Αντίστασης.....	41
2.8.2. Μέθοδος Ακουστικής Πρόσκρουσης.....	42
2.8.3. Μέθοδος Ακουστικών Εκπομπών.....	46
2.9. Άλλες Μέθοδοι.....	49
2.9.1. Έλεγχοι Διαρροής.....	49
2.9.2. Μέθοδος Ωριμότητας.....	49
2.9.3. Δεισδυτικό Ραντάρ Εδάφους.....	50
2.9.4. Μετρητές Πάχους – Πυκνότητας.....	53
2.9.5. Μέτρηση Ρυθμού Διάβρωσης.....	55
3. ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΟ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ – ΥΠΕΡΗΧΟΣ.....	57
3.1.Κρουσίμετρο Αναπήδησης Schmidt.....	57
3.1.1. Προέλευση.....	57
3.1.2. Περιγραφή διαδικασίας.....	57
3.1.3. Λειτουργική Αρχή του Κρουσίμετρου.....	58
3.1.4. Χαρακτηριστικά – Περιορισμοί.....	62
3.1.4.1. Συσχέτιση Τιμής Αναπήδησης – Αντοχής.....	62
3.1.4.2. Επιφανειακοί Παράγοντες Επιρροής.....	62
3.1.4.3. Μειωτικός Συντελεστής λόγω Απανθράκωσης.....	64
3.1.4.4. Επιρροή Τσιμέντου – Τύπου Αδρανών.....	65

3.1.4.5. Εκτίμηση Ποιότητας Δαπέδου.....	66
3.1.5. Είδη Κρουσιμέτρων.....	67
3.2. Υπέρηχος.....	71
3.2.1. Ορισμός.....	71
3.2.2. Διαδικασία Μέτρησης.....	71
3.2.3. Χαρακτηριστικά.....	73
3.2.4. Είδη Διάδοσης.....	74
3.2.5. Εξασφάλιση Βέλτιστης Μέτρησης.....	77
3.2.6. Παράγοντες Επιρροής Μετρήσεων.....	77
3.2.7. Χρήσεις Υπερήχων.....	80
3.2.7.1. Εκτίμηση Μηχανικών Ιδιοτήτων.....	80
3.2.7.2. Εκτίμηση Πάχους Στρώσης Κατώτερης Ποιότητας.....	85
3.2.7.3. Αξιολόγηση των Ζημιών από Πυρκαγιά.....	87
3.2.8. Προδιαγραφές.....	91
3.3. Συνδυασμός Μεθόδων.....	95
3.3.1. SONREB.....	95
3.3.2. Σχέση $R - V - f_{ck}$	98
3.3.3. Στατιστική Ανάλυση Σχέσεων $R - V - f_{ck}$	106
4. ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ	
4.1. Σκυροδέτηση – Δημιουργία Δοκιμίων.....	112
4.2. Μη-Καταστροφικός Έλεγχος Δοκιμίων.....	115
4.3. Καταστροφικός Έλεγχος Δοκιμίων.....	119
4.4. Εξαγωγή Καμπυλών.....	121
4.5. Χρήση της Μεθόδου σε Υφιστάμενες Κατασκευές.....	128
4.6. Συμπεράσματα.....	130
5. ΣΥΝΟΨΗ	
5.1. Σύγκριση Μεθόδων.....	132
5.2. Μη-Καταστροφικές Μέθοδοι στο Μέλλον.....	133
5.3. Γενικά Συμπεράσματα.....	134
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	137

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....144

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Μη-Καταστροφικές δοκιμές (Non Destructive Testing), ή, Μη-Καταστροφικές μέθοδοι (Non Destructive Methods), ή, Μη-Καταστροφικοί Έλεγχοι (Non Destructive Inspection) ονομάζονται οι έλεγχοι που δεν καταστρέφουν το εξεταζόμενο στοιχείο του φορέα του οποίου μελετάται η αντοχή του. Οι ακριβέστερες και πλέον άμεσοι μέθοδοι προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού είναι οι μηχανικές μέθοδοι (καταστροφικές μέθοδοι). Οι μέθοδοι όμως αυτές προϋποθέτουν την καταστροφή των ελεγχόμενων δοκιμίων. Αντίθετα, οι μη-καταστροφικές μέθοδοι αποτελούν επεμβατικές τεχνικές για το προσδιορισμό της ακεραιότητας ενός υλικού, κατασκευαστικού στοιχείου ή τη δομή ή ποσοτική μέτρηση ορισμένων χαρακτηριστικών ενός αντικείμενου χωρίς να προκαλείται ζημία, παραμορφώσεις ή ακόμα και καταστροφή του αντικείμενου δοκιμής. Εξάλλου, η καταστροφή του αντικείμενου δοκιμής καθιστά τον καταστροφικό έλεγχο μια δαπανηρή διαδικασία και σε πολλές περιπτώσεις ακατάλληλη.

Στην ανάπτυξη των μη-καταστροφικών μεθόδων οδήγησε η αναγκαιότητα του να ελέγχονται ολόκληρες οι κατασκευές ή ορισμένα σημαντικά στοιχεία τους, ώστε να εντοπίζεται έγκαιρα η ύπαρξη ή η δημιουργία απρόβλεπτων ανωμαλιών ή περιοχών συγκεντρώσεως των τάσεων που μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία τους, αλλά ακόμα και η αναγκαιότητα του να μπορούν να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες ορισμένων υλικών, ενώ αυτά βρίσκονται σε λειτουργία. Έτσι, διαδραματίζουν καίριο ρόλο στη διασφάλιση της αποτελεσματικής μείωσης κόστους, την ασφάλεια και την αξιοπιστία των εγκαταστάσεων, με συνακόλουθο όφελος για την κοινότητα. Ενώ αρχικά εφαρμόστηκαν μόνο για λόγους ασφαλείας, σήμερα είναι ευρέως αποδεκτές ως τεχνικές εξοικονόμησης κόστους στην διαδικασία διασφάλισης της ποιότητας. Δυστυχώς, εξακολουθούν να μην χρησιμοποιούνται σε πολλές περιοχές όπου η ανθρώπινη ζωή ή η οικολογία είναι σε κίνδυνο. Κάποιοι μπορεί να προτιμούν να πληρώνουν το χαμηλότερο κόστος των αξιώσεων μετά από ένα ατύχημα από την εφαρμογή των μη-καταστροφικών ελέγχων. Αυτό είναι ένα απαράδεκτο ρίσκο διαχείρισης. Καταστροφές όπως το σιδηροδρομικό ατύχημα στο Eschede στη

Γερμανία το 1998, όπου μια ρωγμή κόπωσης σε μια ρόδα προκάλεσε τον εκτροχιασμό του τρένου, είναι μόνο ένα παράδειγμα, υπάρχουν και πολλά άλλα.

Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να δώσουν σημαντικότερες πληροφορίες, τόσο σχετικά με την ύπαρξη επικίνδυνων σημείων στα καταπονούμενα τμήματα των κατασκευών (σημεία συγκεντρώσεως των τάσεων, όπως πχ μικρό-ρωγμές στο εσωτερικό ενός υλικού), όσο και σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών, οι οποίες είναι δυνατόν να μεταβάλλονται ως αποτέλεσμα των συνθηκών και του χρόνου λειτουργίας των κατασκευών. Οι πληροφορίες αυτές, όπως προαναφέρθηκε, συνάγονται χωρίς να απαιτείται καμία πρόσθετη καταπόνηση των υλικών. Αποκτούν λοιπόν ιδιαίτερη σημασία στις περιπτώσεις κατασκευών ή μηχανών υψηλού κινδύνου για τον άνθρωπο, όπως είναι οι πυρηνικοί αντιδραστήρες ή τα αεροσκάφη.

Σύμφωνα με τον Leshchinsky [1], μερικά από τα πλεονεκτήματα των μη-καταστροφικών μεθόδων είναι τα εξής:

- Μείωση του χρόνου και του κόστους της εργασίας των δοκιμών
- Μείωση του χρόνου των προπαρασκευαστικών εργασιών (για παράδειγμα ο καθορισμός της θέσης των οπλισμών και της διαμέτρου τους είναι μια κουραστική διαδικασία)
- Μικρότερη ζημιά στη κατασκευή κατά τη διάρκεια της μέτρησης
- Ελάχιστη πιθανότητα να προκληθεί κάποια βλάβη που να προκαλέσει την ανάγκη για ενίσχυση
- Δυνατότητα δοκιμής αντοχής σκυροδέματος σε κατασκευές όπου δεν μπορούν να παρθούν πυρήνες (λεπτά τοιχώματα, πυκνά ωπλισμένα στοιχεία)
- Απαιτούν φθηνότερο εξοπλισμό.

1.2. Διεθνείς – Ελληνικοί Οργανισμοί Μη Καταστροφικών Ελέγχων

Για την εφαρμογή των μη-καταστροφικών μεθόδων, είναι σημαντικό να περιγραφεί τι πρέπει να καταγραφεί και τι να απορριφθεί. Κάθε μέθοδος έχει διαφορετικό βαθμό ακρίβειας που όμως ποτέ δε φτάνει την απόλυτη ακρίβεια ενός καταστροφικού ελέγχου. Μια εντελώς άψογη εκτέλεση της μεθόδου δεν είναι σχεδόν ποτέ εφικτή. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητες οι προδιαγραφές των δοκιμών. Επιπλέον, εφαρμόζονται πρώτα οι μη-καταστροφικοί έλεγχοι και στη συνέχεια οι

καταστροφικοί, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα και να οριστεί καλύτερα η ακρίβεια της μεθόδου. Σήμερα υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός προτύπων και κανονισμών με υψηλή επιστημονική και τεχνολογική στάθμη. Περιγράφουν το όριο μεταξύ καλών και κακών συνθηκών, αλλά συχνά επίσης τις συγκεκριμένες μεθόδους που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Η αξία της κάθε μεθόδου εξαρτάται από το είδος του προβλήματος. Μια μέθοδος ή τεχνική, λόγω της φύσης και της λειτουργίας της, μπορεί να είναι από ιδανική έως και εντελώς άχρηστη για την εφαρμογή που έχουμε υπόψη μας. Για το λόγο αυτό η σωστή επιλογή είναι σημαντική για την τελική απόδοση του μη καταστροφικού ελέγχου.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η κατάλληλη και επαρκής ειδίκευση του προσωπικού που πραγματοποιεί έναν μη-καταστροφικό έλεγχο. Οι τεχνικές αυτές εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό στην ανθρώπινη ικανότητα και τη γνώση για την ορθή αξιολόγηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων των δοκιμών. Η σωστή και επαρκής εκπαίδευση και πιστοποίηση του προσωπικού λοιπόν είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί ότι οι δυνατότητες των μεθόδων έχουν αξιοποιηθεί πλήρως. Υπάρχει μια σειρά δημοσιευμένων διεθνών και περιφερειακών προτύπων που καλύπτουν την πιστοποίηση της επάρκειας του προσωπικού. Το EN 473 (Ιδιότητα και Πιστοποίηση προσωπικού Μη-Καταστροφικών Ελέγχων - Γενικές Αρχές), αναπτύχθηκε ειδικά για την Ευρωπαϊκή Ένωση ενώ η SNT-TC-1A είναι το αντίστοιχο αμερικανικό πρότυπο.

Στο διεθνή χώρο έχει δημιουργηθεί η Διεθνής Επιτροπή Μη-Καταστροφικών Ελέγχων, η ICNDT (International Committee for Non – Destructive Testing). Μέλη της ICNDT σήμερα είναι 71 εθνικές ενώσεις από όλο τον κόσμο. Η ICNDT ιδρύθηκε το 1955 στις Βρυξέλλες κατά τη διάρκεια του 1^{ου} διεθνούς συνεδρίου μη-καταστροφικών ελέγχων. Σκοπός της είναι να ενθαρρύνει την ανάπτυξη των μεθόδων μέσα από διεθνή συνέδρια που γίνονται κάθε 4 χρόνια, μέσω διεθνών κανονισμών σε συνεργασία και με άλλους φορείς και γενικά να προωθεί διεθνείς συνεργασίες σε οτιδήποτε σχετικό με το αντικείμενο των μεθόδων. Παράλληλα με την ICNDT στην Ευρώπη έχει δημιουργηθεί η Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Μη-Καταστροφικών Ελέγχων, EFNDT (European Federation of Non-Destructive Testing). Ιδρύθηκε στη σύνοδο της Κοπεγχάγης στις 25-5-1998 και αριθμεί 27 μέλη, καθένα των οποίων αποτελεί εθνικό φορέα Μη-Καταστροφικών Ελέγχων της αντίστοιχης Ευρωπαϊκής χώρας.

Η Ελληνική Εταιρία Μη-Καταστροφικών Ελέγχων (ΕΛΕΜΚΕ) ιδρύθηκε το 1987 (Αρ. Εγκρ. Πρωτοδικείου Αθηνών 2861/1987) από μια ομάδα του επιστημονικού και

επαγγελματικού χώρου εργασιών, ως μη κερδοσκοπικό σωματείο. Σύμφωνα με το καταστατικό της εταιρείας και τις διεθνείς συμφωνίες που έχει υπογράψει τόσο με την EFNDT όσο και την ICNDT, είναι ένα εθνικό επιστημονικό σωματείο μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα, του οποίου οι κύριοι σκοποί είναι οι ακόλουθοι :

- Να μεριμνά για την εκπαίδευση και πιστοποίηση των μελών της και άλλων στους ΜΚΕ
- Να προάγει τη τεχνολογία ΜΚΕ στη Ελλάδα
- Να μεριμνά για την οργάνωση διαλέξεων, εκπαιδευτικών σεμιναρίων με θέματα σχετικά με τη τεχνολογία των ΜΚΕ
- Να ενθαρρύνει την έρευνα (θεωρητική και πρακτική) στην επιστήμη και τεχνολογία των ΜΚΕ και να φροντίζει για τη δημοσίευση των αποτελεσμάτων
- Να παρέχει συμβουλές ποιοτικού ελέγχου στους ΜΚΕ
- Να φροντίζει για τη συνεχή βελτίωση των γνώσεων και εμπειρίας των μελών της.
- Να ιδρύσει βιβλιοθήκη με κάθε είδους ερευνητικές εργασίες, κυρίως στη περιοχή ΜΚΕ
- Να αναλάβει την έκδοση ενημερωτικών φυλλαδίων, περιοδικών και βιβλίων για ΜΚΕ

Σήμερα αριθμεί 400 περίπου μέλη, τα οποία είναι στη πλειοψηφία τους στελέχη επιχειρήσεων και της βιομηχανίας όπως και Πανεπιστημιακοί Καθηγητές. Αναγνωρίστηκε σχεδόν αμέσως ως εθνικός φορέας Μη-Καταστροφικών Ελέγχων (22-29 Απριλίου 1989, Άμστερνταμ) και καταβάλει κάθε δυνατή προσπάθεια για να ανταπεξέλθει στο ρόλο της [2].

1.3. Εφαρμογές Μη-Καταστροφικών Μεθόδων

Οι εφαρμογές των μη-καταστροφικών μεθόδων, σήμερα, καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σχεδόν παντού :

- Στην αυτοκινητοβιομηχανία (μηχανή, πλαίσιο)
- Στην αεροδιαστημική (πλαίσια αεροπλάνων και διαστημοπλοίων, πύραυλοι, κινητήρες τζετ)
- Στις κατασκευές (κτίρια, γέφυρες)
- Στη βιομηχανία (μηχανικά εξαρτήματα, καλούπια, πρέσες)
- Σε εγκαταστάσεις πετροχημικές, πυρηνικές, παραγωγής ρεύματος, ορυχεία (πιεστικά δοχεία, δεξαμενές, λέβητες, εναλλάκτες, τουρμπίνες, σωληνώσεις, συγκολλήσεις)
- Στο σιδηρόδρομο (σιδηροτροχιές, τροχοί και άξονες)
- Σε αγωγούς αερίου και πετρελαίου
- Στα πάρκα αναψυχής (παιχνίδια και τρένα μεγάλης ταχύτητας)
- Στην ιατρική (τομογραφίες, υπέρηχοι, ακτινογραφίες, καρδιογραφήματα, εγκεφαλογραφήματα)

Οι μέθοδοι μη-καταστροφικού ελέγχου αναπτύχθηκαν τα τελευταία 100 χρόνια. Μερικά αξιοσημείωτα γεγονότα που άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξή τους ήταν :

- 1854: Δυστύχημα από αστοχία δοχείου υπό πίεση με 21 θύματα και 50 τραυματίες στο Hartford του Connecticut. Δέκα χρόνια μετά ψηφίζεται νόμος για υποχρεωτικούς ετήσιους ελέγχους.
- 1895: Ο Wilhelm Conrad Rontgen ανακαλύπτει τις γνωστές Ακτίνες-X και στη ανακοίνωσή του αναφέρει τη δυνατότητα εντοπισμού ελαττωμάτων στη δομή υλικών.
- 1880 – 1920: Εφαρμόζεται ο πρόδρομος της μεθόδου ελέγχου με διεισδυτικό υγρό με τη χρήση λαδιού και λευκού χρώματος (το εξάρτημα βυθίζεται σε λεπτόρρευστο λάδι και μετά βάφεται με λευκό χρώμα το οποίο μετατρέπεται σε καφέ όταν το λάδι που παρέμεινε σε τυχόν ρωγμές βγαίνει προς τα έξω).

- 1920: Ο Δρ. H. H. Lester αναπτύσσει τη βιομηχανική ραδιογραφία των μετάλλων.
- 1926: Διατίθεται το πρώτο όργανο Ρευμάτων Eddy που μετρά το πάχος υλικού.
- 1927 – 1928: Το πρώτο σύστημα Μαγνητικής Επαγωγής εφαρμόζεται σε σιδηροδρομικές γραμμές.
- 1940 – 1944: Αναπτύσσεται η μέθοδος των υπερήχων από τον Δρ. Floyd Firestone.
- 1950: Ο J. Kaiser εισάγει τη μέθοδο μη-καταστροφικού ελέγχου των Ακουστικών Εκπομπών.

1.4. Μη-Καταστροφικές Μέθοδοι στο Σκυρόδεμα

Όπως είναι γνωστό, το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό σύνθετο υλικό, που κατασκευάζεται από αδρανή υλικά, τσιμέντο και νερό, σε κατάλληλες αναλογίες. Οι διαδικασίες μελέτης και παρασκευής του πρέπει να είναι τέτοιες, ώστε ως νωπό να έχει: (α) σχετική ομοιογένεια και (β) την απαραίτητη εργασιμότητα, ανάλογα με το είδος της κατασκευής, ώστε να μπορεί να διαστρωθεί και να συμπυκνωθεί με τα διαθέσιμα μέσα, και ως σκληρυμένο να έχει: (α) την απαιτούμενη αντοχή, (β) την απαιτούμενη ανθεκτικότητα και (γ) τις πρόσθετες μηχανικές ιδιότητες που απαιτούνται ανάλογα με το είδος της κατασκευής. Επειδή το υλικό αυτό τοποθετείται στις κατασκευές για την ανάληψη κυρίως θλιπτικών φορτίων, λόγω της ιδιότητάς του να εμφανίζει σε αυτά τα φορτία υψηλή σχετικά αντίσταση, ελέγχεται συνήθως με τον προσδιορισμό της αντοχής του μέσω της δοκιμής θλίψεως κυλινδρικών ή κυβικών δοκιμίων, ηλικίας 28 ημερών [3].

Η αποτελεσματικότητα της εξυγίανσης και η επιρροή των διαδικασιών φροντίδας και συντήρησης είναι κρίσιμες για να πάρουμε την πλήρη ικανότητα ενός μίγματος σκυροδέματος. Ενώ γενικά φημίζεται για την ανθεκτικότητά του, είναι ευπαθές σε μια σειρά περιβαλλοντικών διαβρωτικών παραγόντων, οι οποίοι μπορούν να περιορίσουν τη διάρκεια ζωής του. Πάντα υπήρχε η ανάγκη λοιπόν για κάποιους ελέγχους των ιδιοτήτων του σκυροδέματος για την ποιοτική του εξακρίβωση. Το ιδανικό είναι αυτοί οι έλεγχοι να είναι μη-καταστροφικοί ώστε να μη θέτουν σε

κίνδυνο τη λειτουργία της κατασκευής και να επιτρέπουν να γίνεται ξανά έλεγχος στις ίδιες περιοχές ώστε να εκτιμάται και η μεταβολή των ιδιοτήτων στο χρόνο.

Συγκριτικά με την εξέλιξη των μη-καταστροφικών μεθόδων σε μεταλλικές κατασκευές, η εξέλιξή τους στο σκυρόδεμα προχώρησε με χαμηλότερο ρυθμό, καθώς είναι ένα πολύ πιο σύνθετο υλικό συγκριτικά με τον χάλυβα. Το σκυρόδεμα είναι έντονα ανομοιογενές σε μακροσκοπική κλίμακα, δε καταστρέφεται ηλεκτρικά αλλά συνήθως αποτελείται από σημαντικές ποσότητες οπλισμού, και συχνά χρησιμοποιείται σε λεπτά μέλη. Έτσι, δεν ήταν εύκολο να μεταφερθούν οι μη-καταστροφικές μέθοδοι του χάλυβα στο σκυρόδεμα. Επιπλέον, υπήρχε ελάχιστο ενδιαφέρον από την κοινότητα των μη-καταστροφικών ελέγχων να δημιουργήσουν τέτοια τεστ στο σκυρόδεμα. Πριν το 1980, διαλέξεις, συμπόσια και εργαστήρια οργανωμένα από την κοινότητα των μη-καταστροφικών ελέγχων, σπάνια εμπεριείχαν συνεδρίες σχετικά με έργα πολιτικών μηχανικών. Εφαρμοζόμενες μέθοδοι στο σκυρόδεμα που μπορεί να είχαν μελετηθεί σε στρατιωτικά ερευνητικά προγράμματα, ήταν μη διαθέσιμες στους πολιτικούς μηχανικούς ή ήταν πολύ εξελιγμένες και ακριβές για πρακτική εκτέλεση. Παρόλα αυτά τα εμπόδια, δραματικές αλλαγές έγιναν την δεκαετία του 80. Επιπλέον, η κρίση της 'ηλικιακής υποδομής' τόνισε την ανάγκη για αξιόπιστους μη-καταστροφικούς ελέγχους και δαπανήθηκαν σημαντικά ποσά για έρευνα.

Σήμερα, γίνεται έντονη προσπάθεια για τον έλεγχο κατασκευών από σκυρόδεμα με τις μη-καταστροφικές μεθόδους των υπερήχων, της βιομηχανικής ακτινογραφίας με ακτίνες X ή γ και της ακουστικής εκπομπής, όπως και με τη κρουστική μέθοδο (κρουσίμετρο) και τη μέθοδο της εξόλκευσης ήλου, ώστε να είναι δυνατός ο επί τόπου έλεγχος μιας κατασκευής και να αποφεύγεται η λήψη πυρήνων (καρότων) από αυτήν. Προσφέρουν δηλαδή τη δυνατότητα να εκτιμηθεί τη κατάσταση του σκυροδέματος χωρίς να γίνει επέμβαση στο εσωτερικό του. Υπάρχουν πολλοί λόγοι που το σκυρόδεμα φθείρεται και διαβρώνεται όπως λόγω επιβολής θλιπτικών φορτίων, θερμοκρασιακών μεταβολών, χημικής επίθεσης και διάβρωσης των οπλισμών. Όλα αυτά μπορούν να προκαλέσουν κατανεμημένη μικροσκοπική φθορά. Αυτή η μικροσκοπική φθορά μπορεί αργότερα να οδηγήσει σε μεγαλύτερες βλάβες, όπως ρωγμές, διαχωρισμούς σε στρώματα ή απολέπιση. Έτσι τελικά το σκυρόδεμα χάνει την ακεραιότητά του. Η αρχή της ρωγμής συμβαίνει κοντά στο τέλος της ζωής του υλικού και εφόσον δημιουργηθεί μπορεί να μεγαλώσει σχετικά γρήγορα και να

οδηγήσει σε αστοχία. Γι' αυτό είναι σημαντικό να εντοπίζουμε τις ρωγμές στο αρχικό τους στάδιο ή ακόμα καλύτερα να εντοπίζουμε τις μικροσκοπικές αλλαγές στο εσωτερικό του υλικού που οδηγούν τελικά στη ρωγμή. Αυτό επιτυγχάνεται με τις μη-καταστροφικές δοκιμές οι οποίες προσφέρουν απλότητα και ταχύτητα στη χρήση. Οι μη-καταστροφικές μέθοδοι ελέγχου εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον έλεγχο κατασκευών από σκυρόδεμα που έχουν υποστεί βλάβες από διάφορες αιτίες, όπως από σεισμούς, πυρκαγιά και κόπωση. Επιπλέον, οι μέθοδοι αυτές αποτελούν μοναδικό στόχο και ελπίδα για τον άμεσο, ταχύ, ασφαλή, αξιόπιστο και ακίνδυνο για τον άνθρωπο τρόπο ελέγχου τέτοιων κατασκευών.

Ωστόσο, μια μη-καταστροφική μέθοδος που θα προσδιορίζει τη θλιπτική αντοχή για κάθε είδους σκυρόδεμα δεν έχει ανακαλυφθεί ακόμα και μοιάζει πολύ δύσκολο να ανακαλυφθεί. Οι μη καταστροφικές μέθοδοι που υπάρχουν, είναι τόσες σε αριθμό και ποικιλία όσα είναι και τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος που θέλουμε να εκτιμήσουμε. Η θλιπτική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, η σκληρότητα, η στεγανότητα και πολλά άλλα είναι απαραίτητα σε διάφορες εφαρμογές. Μεγαλύτερη σημασία αποδίδεται σε μερικά χαρακτηριστικά σε σχέση με άλλα εξαιτίας της εφαρμογής τους. Ένα παράδειγμα αποτελεί το κλασικό τεστ υπολογισμού της θλιπτικής αντοχής που θεωρείται ως το καλύτερο μέτρο καθορισμού της ποιότητας του σκυροδέματος, αν και κάποιοι διαφωνούν διότι θεωρούν ότι δεν υπολογίζει κάποια θεμελιώδη ιδιότητά του. Επίσης, δε πρέπει να έχουμε απόλυτη εμπιστοσύνη στις καμπύλες βαθμονόμησης που διαθέτει το μηχάνημα κάποιας μεθόδου (Schmidt, ultrasonic), καθώς ο κατασκευαστής του τις πραγματοποίησε χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα κυβικά δοκίμια των οποίων οι αναλογίες του σκυροδέματος μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές από τις δικές μας μετρήσεις. Η διαδεδομένη υιοθέτηση των μη-καταστροφικών μεθόδων, λοιπόν, πρέπει να βασίζεται σε μια ξεκάθαρη αντίληψη των ικανοτήτων και των περιορισμών της κάθε μεθόδου.

Υπάρχουν 3 κύριοι λόγοι που οι μη-καταστροφικές μέθοδοι στο σκυρόδεμα δεν έχουν φτάσει στο μέγιστο της απόδοσής τους. Ο πρώτος είναι ότι η κάθε δοκιμή προσπαθεί να πετύχει την αποκλειστική χρήση για το κάθε πείραμα αντί να υπάρχει μια ιεραρχία για το ποια δοκιμή είναι καταλληλότερη για τη κάθε περίπτωση. Δεύτερον, υπάρχουν πολλοί άπειροι ερμηνευτές που δεν αναγνωρίζουν τα φυσικά όρια των μη-καταστροφικών μεθόδων και προσπαθούν να βγάλουν αδιευκρίνιστα συμπεράσματα από περιορισμένα δεδομένα. Τρίτον, είναι σχεδόν άγνωστες οι

μέθοδοι στους ιδιώτες για χρήση στις διάφορες εφαρμογές. Δε τίθεται αμφισβήτηση ότι , αν χρησιμοποιηθούν σωστά, οι μη καταστροφικές μέθοδοι μπορούν να παρέχουν πολύ χρήσιμες πληροφορίες για την κατάσταση μιας κατασκευής που δε μπορούν να προσδιοριστούν με άλλο τρόπο.

2. ΕΙΔΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Παραδείγματα Μεθόδων και Τεχνικών ΜΚΕ

<p>Οπτικές Μέθοδοι</p> <ul style="list-style-type: none"> Οπτικός έλεγχος (Visual Inspection) Οπτικός έλεγχος με μικροσκόπιο Οπτικός έλεγχος με Βιντεοσκόπηση (Video Inspection) Οπτικές μέθοδοι με Laser: <ul style="list-style-type: none"> Ολογραφία (Holography) Συμβολομετρία (ESP Interferometry) Δυναμικός Έλεγχος Επιφανείας (Dynamic Surface-Inspection) <p>Ραδιογραφικές μέθοδοι (Radiographic testing) όπως:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ακτίνες Χ (X-rays) και Ακτίνες Γάμα (Gamma rays) Ψηφιακή Τομογραφία (Computed Tomography) Υποατομικά Σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια) (Neutron Radiography) <p>Μέθοδοι Υπερήχων (Ultrasonic inspection)</p> <ul style="list-style-type: none"> Τεχνικές Ανάκλασης Τεχνικές Περιθλάσης (Time of Flight Diffraction ultrasonics – TOFD) Συστοιχίες Φάσης Υπερήχων (Phased Array ultrasonics) Περιστροφόμενα συστήματα (Internal Rotary Inspection System - IRIS) <p>Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά (Liquid Penetrant Flaw testing)</p> <p>Μέθοδοι Ακουστικών Εκπομπών (Acoustic Emission, AE) – (φάσμα υπερήχων)</p> <p>Μέθοδος Θερμικών Εκπομπών (Thermal Emission)</p> <p>Ηλεκτρικές μέθοδοι</p> <ul style="list-style-type: none"> Ρεύματα Eddy (Eddy-Current & Remote field testing - RFT) Μέθοδος Πτώσης Δυναμικού (Potential Drop) <p>Μαγνητικές μέθοδοι</p> <ul style="list-style-type: none"> Έλεγχος Μαγνητικό Μελάνι/Σκόνη (Magnetic Ink/Powder) Έλεγχος με Μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Particles) Μαγνητογραφία (Magnetography) Απώλεια Μαγνητικής Ροής (Magnetic flux leakage - MFL) Έλεγχος θορύβου Barkhausen. <p>Μηχανικοί Έλεγχοι</p> <ul style="list-style-type: none"> Μέθοδος Ακουστικής Πρόσκιρσης (Acoustic-Impact) – (ηχητικό φάσμα) Θερμογραφικός Έλεγχος (Thermographic inspection) (υπέρυθροι έλεγχοι) Μέθοδοι Μηχανικής Αντίστασης (Mechanical Impedance) Έλεγχοι Ταλαντώσεων (Vibration Monitoring) <p>Έλεγχοι Διαρροής (Leak Detection & testing)</p> <p>Μικροκυματικές μέθοδοι (Microwave)</p> <p>κλπ.</p>

2.1. Οπτικές Μέθοδοι

2.1.1. Οπτικός Έλεγχος (visual inspection)

Ο οπτικός έλεγχος είναι ίσως ο πιο σημαντικός από όλες τις μη-καταστροφικές δοκιμές. Μπορεί συχνά να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για το άρτια εκπαιδευμένο μάτι. Οπτικές λειτουργίες ενδέχεται να σχετίζονται με κατασκευαστικές ατέλειες, με τη συντήρηση της κατασκευής, με την πιθανή αλλοίωση του υλικού και είναι ιδιαίτερα σημαντικό το γεγονός ότι ο μηχανικός έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει σύμφωνα με την πείρα του τις διάφορες επικίνδυνες καταστάσεις. Τέτοιες μπορεί να θεωρηθούν ρωγμές, θραύσεις, διάλυση, αλλαγή του χρώματος, αποσάθρωση, κηλίδες στην επιφάνεια και η έλλειψη ομοιομορφίας. Εκτενής πληροφορίες μπορούν να συγκεντρωθούν από οπτική επιθεώρηση για να ληφθεί μια πρώτη ένδειξη της κατάστασης της δομής του σκυροδέματος και να επιτραπεί η διαμόρφωση ενός μεταγενέστερου προγράμματος δοκιμών. Η μακροσκοπική εξέταση όμως δεν περιορίζεται μόνο στη μελέτη της δομής του αλλά πρέπει να ασχολείται και με το γύρω περιβάλλον και με την κλιματική κατάσταση. Αυτό ίσως να ναι και το πιο σημαντικό και δύσκολο μέρος της έρευνας και αυτό που θεωρούμε αυτονόητο για ένα τμήμα της κατασκευής να μην ισχύει για ένα άλλο.

Ο μηχανικός για να εκτελέσει επιτυχώς τον οπτικό έλεγχο χρειάζεται κατάλληλα εργαλεία όπως μετροταινία, θερμόμετρα και ανεμόμετρα. Κιάλια, τηλεσκόπια, ή ενδοσκόπια μπορούν να βοηθήσουν όταν η πρόσβαση είναι δύσκολη. Επιπλέον μια καλή φωτογραφική μηχανή με τα απαραίτητα ζουμ και φακούς και άλλα αξεσουάρ, διευκολύνει την εικαστική τεκμηρίωση των ελαττωμάτων, καθώς και ένα φορητό χρωματολόγιο είναι χρήσιμο στον εντοπισμό διακύμανσης του χρώματος του σκυροδέματος. Τέλος η ύπαρξη όλων των απαραίτητων σχεδίων για την καταγραφή των λεπτομερειών και των παρατηρήσεων θεωρείται επιβεβλημένη.

Πριν από την πραγματοποίηση του ελέγχου ο μηχανικός πρέπει να συγκεντρώσει όλα τα απαραίτητα σχέδια της κατασκευής, τα διάφορα διαθέσιμα έγγραφα, να μελετήσει τις εκθέσεις τυχόν μετρήσεων που έγιναν στην κατασκευή στο παρελθόν και να συλλέξει πληροφορίες για τα υλικά κατασκευής και τις απαραίτητες ημερομηνίες όλων των ενεργειών στην κατασκευή.

Η έρευνα πρέπει να γίνεται συστηματικά και να καλύπτει όλα τα πιθανά ελαττώματα της κατασκευής, και να ελέγχεται, εκτός από τη δομή του σκυροδέματος της εξεταζόμενης κατασκευής, και τα χαρακτηριστικά του γύρω περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα πρέπει να εντοπίζεται το μέγεθος της ζημίας που έχει προκληθεί και η έκταση στην οποία έχει εμφανιστεί. Θα πρέπει για παράδειγμα να γνωρίζουμε αν η ζημιά προκλήθηκε από ένα τυχαίο συμβάν ή κάτω από μια γνωστή κατάσταση ώστε να μπορούμε να αντιμετωπίσουμε σωστά το πρόβλημα και να προβλέψουμε ίσως την συμπεριφορά του υλικού στο μέλλον. Επιπλέον, η σύγκριση μελών με παρόμοια χαρακτηριστικά δίνει τη δυνατότητα να εντοπίσουμε την έκταση της ζημίας και ίσως να προβλέψουμε τη συμπεριφορά της κατασκευής που μας ενδιαφέρει (ιδίως όταν τα μέλη που συγκρίνουμε είναι παρόμοιας ηλικίας).

Σημαντικές πληροφορίες παίρνουμε από τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων σε έντονα καταπονούμενες αρθρώσεις και από το σχηματισμό των ρωγμών εκεί. Η καταγραφή των ρωγμών αποτελεί ένα πολύτιμο διαγνωστικό εργαλείο για τον προσδιορισμό των αιτιών και της εξέλιξης της φθοράς. Ομοίως, η υφή και το χρώμα της επιφάνειας μπορεί να μας δώσει σημαντικές πληροφορίες και ιδιαίτερα το χρώμα μας βοηθάει στην ανάλυση καταστροφών από πυρκαγιές.

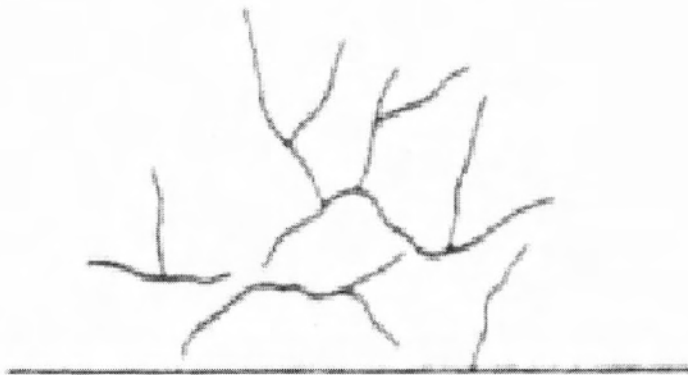
Η μακροσκοπική ανάλυση όμως δεν περιορίζεται στον επιφανειακό μόνο έλεγχο των μελών της κατασκευής αλλά πρέπει να ελεγχθούν τμήματα όπως έδρανα, αρμοί διαστολής, αποχετευτικοί σωλήνες κλπ. Οποιοδήποτε πρόβλημα αυτών θα μπορούσε να εντοπιστεί από τη σύγκριση με τον αρχικό σχεδιασμό τους και με τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάστηκαν να λειτουργούν.

Μια αξιολόγηση μπορεί επίσης να χρειασθεί πάνω σε ιδιαίτερες περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες κάθε μέρος της δομής έχει εκτεθεί. Ειδικότερα, η ύγρανση και ξήρανση και η διακύμανση της θερμοκρασίας στην οποία ένα στοιχείο υποβάλλεται θα πρέπει να καταγράφονται διότι οι εν λόγω παράγοντες επηρεάζουν διάφορους μηχανισμούς της φθοράς του σκυροδέματος. Για παράδειγμα, σε θαλάσσιες περιοχές θα πρέπει να υπάρχει ειδική μέριμνα του γύρω εδάφους και προσοχή σε τυχόν αναφορές για γεωτεχνικά προβλήματα ενώ σε ακραίες χαμηλές θερμοκρασίες τυχόν παγετός μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην φθορά του σκυροδέματος.

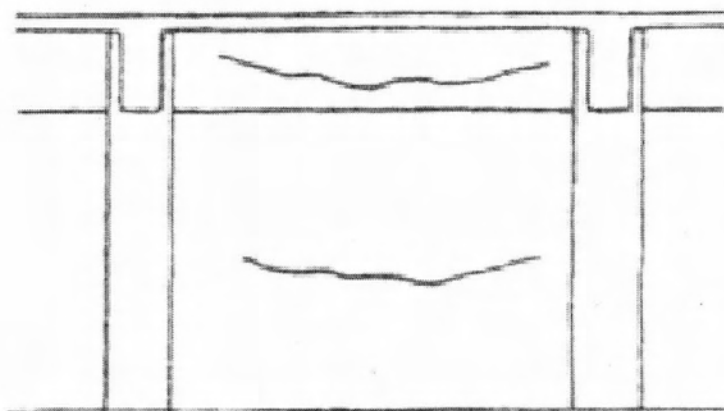
Μια προσεκτική και λεπτομερής καταγραφή όλων των παρατηρήσεων πρέπει να πραγματοποιηθεί με τη προσθήκη σχεδίων της σοβαρότητας της κάθε περιοχής. Ελαττώματα που συνήθως χρίζουν καταγραφής είναι τα εξής:

- ρωγμές ,οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με το αίτιο .
- επιφάνεια διάβρωσης η θραύσης
- μεγάλες παραμορφώσεις
- ασυνέχειες
- χαλάρωση

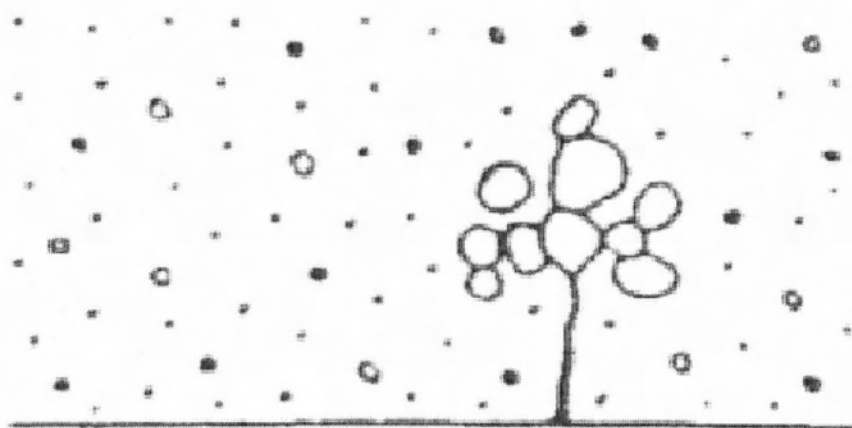
ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΙΘΑΝΩΝ ΖΗΜΙΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ



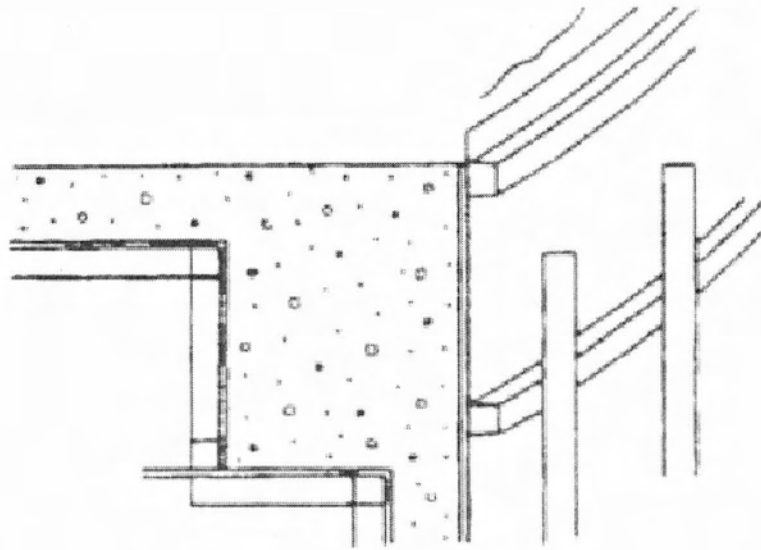
Σχήμα 2.1: Επιφάνεια ενός σκυροδέματος που έχει αναμιχθεί για υπερβολικά μεγάλο χρονικό διάστημα.



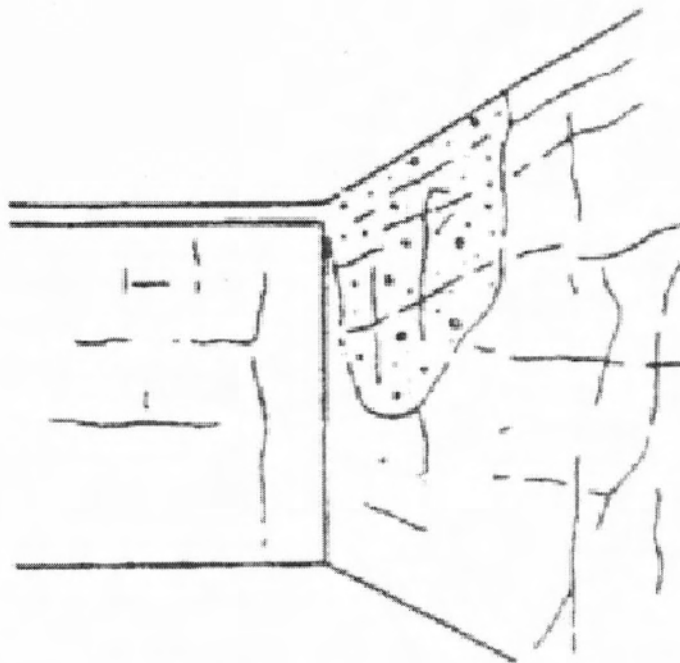
Σχήμα 2.2: Σχηματισμός ρωγμών λόγω καθίζησης.



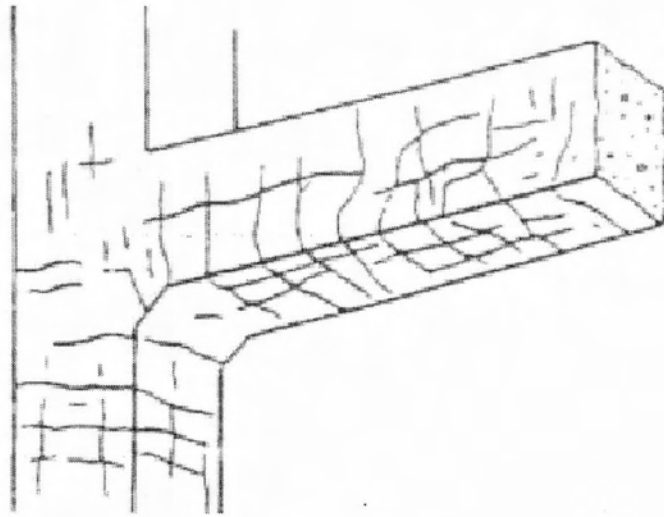
Σχήμα 2.3: Εκτεθειμένα αδρανή.



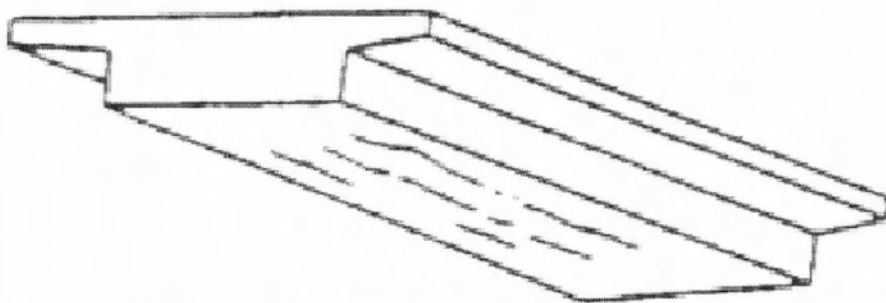
Σχήμα 2.4 : Πρόβλημα στον ξυλότυπο.



Σχήμα 2.5: Σοβαρή οξείδωση του χάλυβα λόγω χημικής καταπόνησης.



Σχήμα 2.6: Επίδραση φωτιάς στο σκυρόδεμα.



Σχήμα 2.7: Ρωγμές λόγω ανεπαρκών ράβδων οπλισμού.

2.1.2. Οπτικός Έλεγχος με Μικροσκόπιο

Σήμερα, χάρη στην κατασκευή ισχυρών μικροσκοπίων, μπορούμε να παρατηρήσουμε ακόμη και τη δημιουργία των μικρό-ρωγμών σε κρυσταλλικό επίπεδο. Με την προϋπόθεση λοιπόν ότι μια ρωγμή βρίσκεται στην επιφάνεια του υλικού και χρησιμοποιώντας την κατάλληλη οπτική συσκευή μπορούμε να την παρατηρήσουμε με μεγάλη ακρίβεια και να παρακολουθήσουμε τη διάδοσή της.

Σε εργαστηριακό επίπεδο, ο οπτικός έλεγχος αποτελεί τη κύρια μέθοδο αναφοράς για όλες τις άλλες μεθόδους μη-καταστροφικού ελέγχου. Τα εργαστηριακά δοκίμια σχεδιάζονται έτσι ώστε η ρωγμή να είναι ορατή από το μικροσκόπιο του οποίου οι μετρήσεις θεωρούνται ακριβέστερες των άλλων μεθόδων. Με τη μέθοδο αυτή αξιολογούνται και ρυθμίζονται όλες οι άλλες μέθοδοι μη-καταστροφικού ελέγχου πριν εφαρμοστούν.

2.1.3. Οπτικός Έλεγχος με Βιντεοσκόπηση

Αγωγοί υγρών και αερίων, αποχετεύσεις και αγωγοί όμβριων υδάτων μπορούν να εξεταστούν οπτικά στο εσωτερικό τους με τη χρήση βιντεοκάμερας η οποία εισάγεται και μετακινείται μέσα στον αγωγό. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται η κατάστασή τους χωρίς να χρειαστούν εκσκαφές ή διακοπή της παροχής.



Σχήμα 2.8

2.2. Επιφανειακές Μέθοδοι

2.2.1. Σκληρότητα Επιφάνειας

2.2.1.1. Διεισδυτικές Μέθοδοι

Πρωτοεμφανίστηκαν στη Γερμανία το 1934. Η μέθοδος, παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο σκληρότητας μετάλλων, πραγματοποιείται εφαρμόζοντας ένα γνωστό φορτίο σε μια ατσαλένια μπάλα και μετρώντας τη διάμετρο της διεΐσδυσής της στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η μέση διάμετρος για έναν αριθμό κοντινών διεΐσδύσεων χρησιμοποιείται για να δημιουργηθούν διαγράμματα ή πίνακες που δίνουν τη θλιπτική δύναμη. Ωστόσο υπάρχει τέτοια διασπορά στα αποτελέσματα που δεν καθιστά τη μέθοδο αξιόπιστη και πρακτική [4].

2.2.1.2. Κρουσίμετρο Αναπήδησης Schmidt

Η δοκιμή χαρακτηρίζεται ως δοκιμή σκληρότητας και βασίζεται στην αρχή ότι η αναπήδηση μιας ελαστικής μάζας εξαρτάται από τη σκληρότητα της επιφάνειας στην οποία η μάζα προσκρούει. Η ενέργεια που απορροφάται από το σκυρόδεμα συνδέεται με την αντοχή του [5]. Παρά την φαινομενική απλότητά του, το κρουσίμετρο αναπήδησης περιλαμβάνει περίπλοκα προβλήματα κρούσης. Περισσότερα για αυτή τη μέθοδο στο κεφάλαιο 3.

2.2.1.3. Pullout Test

Στη μέθοδο αυτή τρυπάμε την περιοχή που θέλουμε να μετρήσουμε με τρυπάνι διαμέτρου 15 mm και βάθους 30 mm και τοποθετούμε το βύσμα. Η δύναμη αποχώρησης και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος υπολογίζονται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$F_p = \frac{P}{A} (\text{kg} / \text{cm}^2)$$

όπου

P η δύναμη αποχώρησης

F_p η τάση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια κατά την αποχώρηση

A το εμβαδόν της οπής

Στη συνέχεια η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος υπολογίζεται από τον τύπο

$$F_c = 97 F_p - 205.$$

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι 3 βαθμοί φθοράς του σκυροδέματος, ανάλογα με τη δύναμη αποχώρησης, σαν ποσοστό της δύναμης σχεδιασμού :

Πίνακας 2.1 [6]

Degree of deterioration	% of the design strength
I (no deterioration)	100 and over
II (deteriorated)	75-100
III (severe deterioration)	Less than 75%

2.2.1.4. Μέτρηση Βάθους Ενανθράκωσης

Το φαινόμενο της ενανθράκωσης συμβαίνει όταν το διοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με τα στοιχεία του ενυδατωμένου τσιμέντου για να παραχθούν άλατα ανθρακικού οξέος. Η ενανθράκωση μεταδίδεται κάτω από την εκτεθειμένη επιφάνεια ιδιαίτερα αργά. Ο χρόνος που απαιτείται για να γίνει η ενανθράκωση δίνεται από τον τύπο :

$$t = \left(\frac{d}{k}\right)^2$$

όπου

t είναι ο χρόνος ενανθράκωσης

- d η επικάλυψη του σκυροδέματος
- κ η διαπερατότητα

Ένας κλασικός τρόπος για να υπολογίσεις το βάθος της ενανθράκωσης είναι αξιοποιώντας την ηλικία της κατασκευής, το λόγο νερού προς τσιμέντο και μίας σταθεράς που ποικίλει ανάλογα με την επικάλυψη του σκυροδέματος. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται μέσω του παρακάτω τύπου :

$$y = \frac{7.2}{R^2(4.6x - 1.76)^2} C^2$$

όπου

y η ηλικία του κτηρίου σε χρόνια

R μια σταθερά

X το βάθος ενανθράκωσης

C ο λόγος νερού προς τσιμέντο

Η σταθερά R δίνεται από τη σχέση $R=a*\beta$, όπου β εξαρτάται από την επικάλυψη του σκυροδέματος και α από το εάν το στοιχείο βρίσκεται σε επαφή με το περιβάλλον ή όχι. Τελικά το ζητούμενο βάθος δίνεται από τον τύπο :

$$C = \frac{y^{1/2} R(4.6x - 1.76)}{\sqrt{7.2}}$$

2.2.2. Απορρόφηση – Διείσδυση Υγρών

2.2.2.1. Επιφανειακή Απορρόφηση Νερού

Το μειονέκτημα του σκυροδέματος να αλλοιώνεται υπό τη επιρροή του καιρού ή χημικών παραγόντων οφείλεται κυρίως στο πορώδες του. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί πληρώνοντας τα κενά της κατασκευής με τσιμέντο ή καλά αδρανή. Ο έλεγχος απορρόφησης χρησιμοποιείται σαν μέτρο αντοχής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως η ποσοστιαία αύξηση στο βάρος του παρασκευασμένου δοκιμίου από στεγνό σκυρόδεμα μετά από βύθιση για ένα σεβαστό διάστημα σε νερό. Ο Levitt [7] περιγράφει την αρχική δοκιμή επιφανειακής απορρόφησης στο οποίο μετράται ο ρυθμός της ροής του νερού μέσα στο σκυρόδεμα ανά μονάδα επιφάνειας σε ένα συγκεκριμένο διάλειμμα από την εκκίνηση και γνωρίζοντας τη θερμοκρασία εκείνη τη στιγμή. Η περισσότερη από τη βιβλιογραφία αναφέρεται σε υψηλή διαπερατότητα πίεσης με πιέσεις $0 - 7 \text{ N/mm}^2$ (100 lb/in^2). Τέτοιες πιέσεις μπορούν να καταστρέψουν τριχοειδείς κατασκευές που δε θα πάθαιναν τίποτα από τα χειρότερα καιρικά φαινόμενα. Τα τεστ χαμηλής πίεσης αρχικής επιφανειακής απορρόφησης αναπαριστούν συνθήκες πίεσης αντίστοιχες με το διπλάσιο των πιέσεων του πιο δυνατού ανέμου και βροχής. Ο έλεγχος αρχικής επιφανειακής απορρόφησης αποδείχτηκε πολύ ευαίσθητος σε αλλαγές στη ποιότητα και συσχετίζεται με καιρικές αλλαγές και αυτό παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια τεστ πήξης/τήξης.

2.2.2.2. Μέθοδος Διεισδυτικών Υγρών

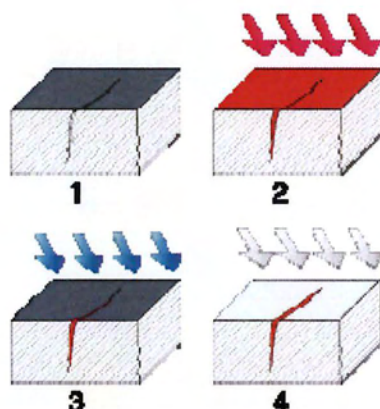
Ο έλεγχος με διεισδυτικό υγρό ή χρωστική ουσία χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό επιφανειακών ρωγμών σε μη σιδηρούχα κράματα ή σε σιδηρούχα κράματα στα οποία δεν μπορεί να εφαρμοστεί κάποια αντίστοιχη ηλεκτρική ή μαγνητική μέθοδος. Μερικές φορές εφαρμόζεται και σε μη μεταλλικά υλικά.

Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι τα εξής:

- 1) Το υπό εξέταση υλικό, το οποίο περιέχει ρωγμές, μη ορατές με γυμνό οφθαλμό, καθαρίζεται επιμελώς.
- 2) Το διεισδυτικό υγρό απλώνεται στην επιφάνειά του υλικού ώστε να εισχωρήσει μέσα στις ρωγμές. Μικρότερα αντικείμενα βυθίζονται και ολόκληρα μέσα στο υγρό.

3) Στη συνέχεια το πλεονάζον υγρό αφαιρείται και η επιφάνεια καθαρίζεται ώστε στο υλικό να παραμείνει μόνο το υγρό που έχει εισχωρήσει στις ρωγμές.

4) Τέλος, στην επιφάνεια του υλικού απλώνεται ένα υγρό ή σκόνη «εμφάνισης», η οποία όταν έρχεται σε επαφή με το διεισδυτικό υγρό δημιουργεί έντονη χρωματική αντίθεση. Η έντονη αλλαγή στο χρώμα κάνει τις επιφανειακές ρωγμές ορατές.



Σχήμα 2.9: Εντοπισμός ρωγμής με χρήση διεισδυτικών υγρών.

Η επιλογή του κατάλληλου διεισδυτικού υγρού καθορίζεται από την ευκολία διείσδυσής του στις ρωγμές και φυσικά την ευκολία εξαγωγής του από αυτές μετά τον έλεγχο. Η απλούστερη και παλαιότερη μέθοδος χρησιμοποιεί για διεισδυτικό λεπτόρρευστο λάδι και για την εμφάνιση λευκή σκόνη ανθρακικού ασβεστίου, η οποία χρωματίζεται έντονα από το λάδι των ρωγμών. Παραλλαγές της μεθόδου περιλαμβάνουν φωσφορίζουσες χρωστικές που γίνονται εύκολα ορατές με τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας.

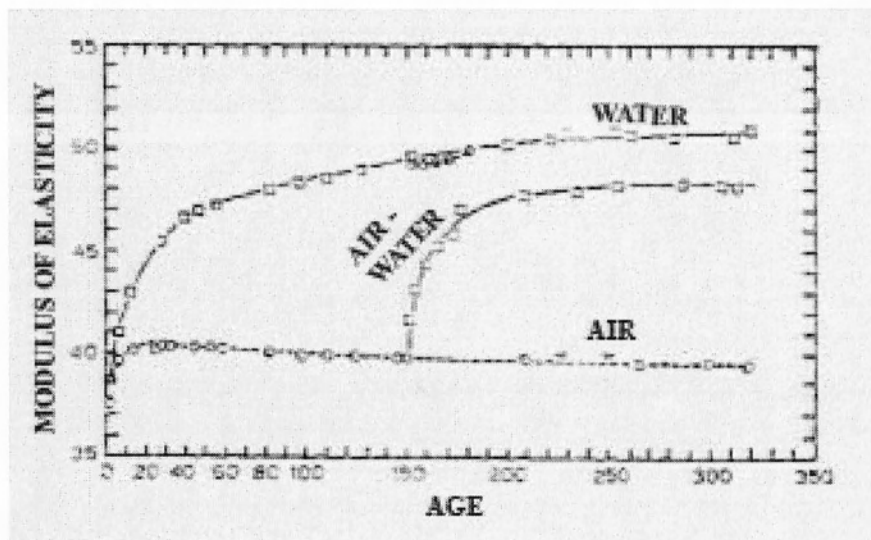
2.3. Μέθοδος Δόνησης και Συντονισμού

2.3.1. Διαμήκης Καμπτικός και Στρεπτικός Συντονισμός

Ο πιο εύκολος τρόπος μέτρησης του μέτρου ελαστικότητας στο σκυρόδεμα είναι με μεθόδους δόνησης.[4] Τα δοκίμια είναι δοκοί ή κύλινδροι, παρόμοια με τα κλασσικά που χρησιμοποιούνται για καμπτικούς και θλιπτικούς ελέγχους αντοχής. Τα δοκίμια υποβάλλονται σε δονήσεις από ταλαντωτές μεταβλητής συχνότητας οι οποίοι

προκαλούν ηλεκτρικές ταλαντώσεις στο κινούμενο πηνίο του δονητή. Μια συσκευή στο ελεύθερο άκρο του δοκιμίου εντοπίζει τις δονήσεις. Με βάση τις συντονισμένες συχνότητες μπορούν να υπολογιστούν και οι απαιτούμενες τιμές των δυναμικών σταθερών του σκυροδέματος. Ο καλύτερος τρόπος εντοπισμού ενός συντονισμού είναι από τον αριθμό και τη θέση των κόμβων και των συμμετρικών τους κατά μήκος του δοκιμίου. Σε καμπτικούς συντονισμούς για παράδειγμα αυτοί μπορούν εύκολα να εντοπιστούν από βοηθητικά μέσα που βρίσκονται σε επαφή με την κορυφή του δοκού και είναι ευαίσθητα σε κατακόρυφη μετακίνηση.

Επειδή αλλαγές στις δυναμικές σταθερές σχετίζονται εμπειρικά με αλλαγές στην αντοχή, η μέθοδος των συντονισμένων συχνοτήτων χρησιμοποιείται για να ακολουθήσουν τις αλλαγές στη ποιότητα, τη σκληρότητα και την αντοχή. Μια από αυτές τις αλλαγές φαίνεται στο σχήμα 2.10 όπου οι συνθήκες συντήρησης του σκυροδέματος (νερό, ατμός) επηρεάζουν το μέτρο ελαστικότητας. Τέτοιες μεταβολές πρέπει να λαμβάνονται προσεκτικά υπόψη.



Σχήμα 2.10: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας σε δοκίμια που εκτίθενται σε νερό και αέρα [4].

Αντοχή σε παγετό και διάβρωση από θειάφι ή βοθρολύματα επίσης μελετούνται χρησιμοποιώντας αυτές τις μεθόδους. [8]

Όταν το μέτρο ελαστικότητας καθοριστεί είναι απλή διαδικασία έπειτα να υπολογιστεί ο συντελεστής Poisson. ($\nu = (E/2G) - 1$)

2.3.2. Μέτρηση Απόσβεσης

Ο καθορισμός του συντελεστή απόσβεσης σε πειράματα συντονισμού μπορεί να υπολογιστεί από :

- Την μέτρηση ενός εύρους από την καμπύλη συντονισμού [9]
- Την μέτρηση της λογαριθμικής μείωσης των ελεύθερων ταλαντώσεων

Στη πρώτη μέθοδο καθορίζονται οι συχνότητες f_1 και f_2 από οποιαδήποτε πλευρά της συχνότητας συντονισμού f_0 τέτοιες ώστε τα αντίστοιχα εύρη να είναι 0.707 φορές το εύρος του συντονισμού. Η σταθερά απόσβεσης Q δίνεται από τον τύπο :

$$Q = f_0 / f_2 - f_1$$

Οι μέθοδοι συχνότητας συντονισμού περιορίζονται για χρήση μόνο στο εργαστήριο σε δοκίμια που σύμφωνα με τον Brunarski [10], ο οποίος αναφέρει τις τελικές συμβουλές από την RILEM Working Group, όσον αφορά τη μορφή, τις διαστάσεις, της συνθήκες συντήρησης και την ηλικία των δοκιμίων.

2.4. Μέθοδοι Παλμικής Διάδοσης

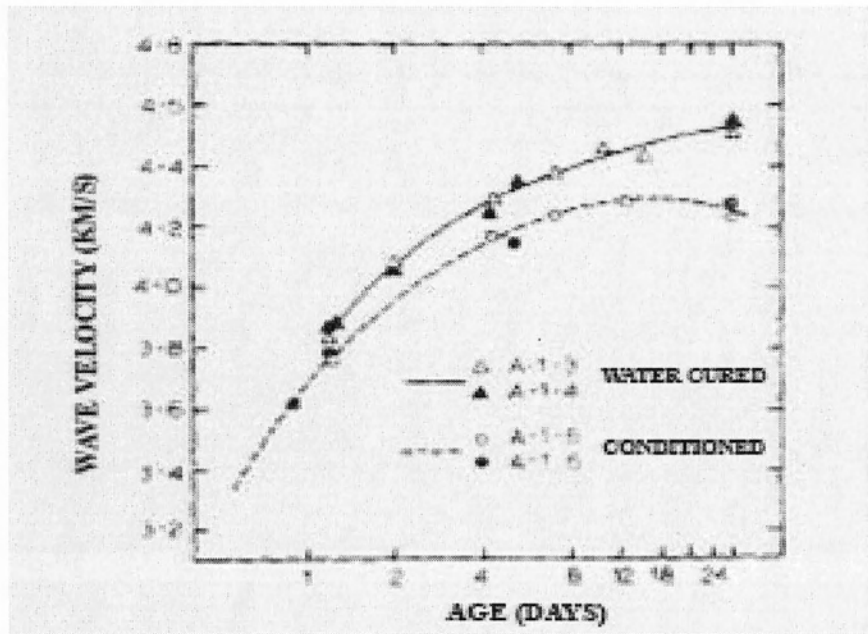
2.4.1. Κύματα Αιφνίδιας Διαταραχής

Ο Long, ο Kurtz και ο Sandenaw [11] πρώτοι ανέφεραν μια παλμική τεχνική για να εξετάσουν το σκυρόδεμα στα πεζοδρόμια. Ο παλμός παράχθηκε από ένα χτύπημα από σφυρί στη επιφάνεια και η ταχύτητα του διαμήκους κύματος V μετρήθηκε ανάμεσα σε 2 ανιχνευτές κατά μήκος της επιφάνειας του πεζοδρομίου. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε από το τύπο:

$$V^2 = \frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}$$

Όπου η πυκνότητα ρ ήταν γνωστή και ο συντελεστής Poisson θεωρήθηκε 0.15. Η υπόθεση δεν είναι ακριβής διότι ο συντελεστής Poisson κυμαίνεται από 0.18 έως 0.3 κάτι που μπορεί να μεταβάλλει το μέτρο ελαστικότητας E μέχρι και 28%.

Ο Andersen και ο Nerenst [12] περιγράφουν το ίδιο χρησιμοποιώντας το χρονογράφημα της ταχύτητας ενός διαμήκους κύματος που παράχθηκε από μια αξονική δύναμη. Αυτοί εξέτασαν την επίδραση της ηλικίας και τις συνθήκες συντήρησης στη ταχύτητα του κύματος όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.11:



Σχήμα 2.11: Μεταβολή ταχύτητας διαμήκους κύματος συναρτήσει της ηλικίας [12].

Αυτές οι μέθοδοι δε χρησιμοποιούνται πλέον, έχοντας ξεπεραστεί από τις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους.

2.4.2. Μέθοδοι Υπερήχων

Ο γενικός κανόνας της δοκιμής είναι ότι η ταχύτητα του ήχου σε ένα στερεό υλικό, όγκου V , είναι μια συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του λόγου του μέτρου ελαστικότητας, E , προς τη πυκνότητά του, d , :

$$V = f \left(\frac{gE}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας [13].

Η μέθοδος ξεκινά με το καθορισμό του απαραίτητου χρόνου που χρειάζεται ένας παλμός δονήσεων σε μια υπερηχητική συχνότητα, να ταξιδέψει μέσα στο σκυροδέμα. Όταν καθοριστεί η ταχύτητα, μια άποψη για την ποιότητα, την ομοιομορφία, την κατάσταση και την αντοχή του δοκιμαζόμενου σκυροδέματος μπορεί να επιτευχθεί. Αναλυτικά η μέθοδος στο 3^ο κεφάλαιο.

2.5. Ραδιογραφικές Μέθοδοι

2.5.1. Ακτίνες X (Rontgen)

Από την ανακάλυψή τους το 1895 μέχρι σήμερα, οι ακτίνες-X χρησιμοποιούνται για τον μη-καταστροφικό έλεγχο ανθρώπων και υλικών. Η εξέταση ενός υλικού με τις ακτίνες X επιτρέπει τον εντοπισμό των περιοχών μειωμένης πυκνότητας ή πάχους, που αντιστοιχούν στις μικρό-ρωγμές, φυσαλίδες αέρα κλπ στο εσωτερικό του υλικού. Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για μεταλλικές κατασκευές, αρκεί το πάχος του υλικού να μην υπερβαίνει τα 100 mm [14].

2.5.2. Ακτίνες γ

Οι ακτίνες γ είναι υπερβολικά μικρού μήκους ηλεκτρομαγνητικά κύματα που αντιπροσωπεύουν μια πολύ διαπεραστική ακτινοβολία. Το κοβάλτιο με μαζικό αριθμό 59 όταν τοποθετείται σε έναν ατομικό αντιδραστήρα δίνει κοβάλτιο 60 το οποίο είναι ραδιενεργό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πηγή για ακτίνες γ .

Εάν ακτινοβολία έντασης I προσπέσει σε ένα σώμα με πάχος dx , το ποσοστό απορροφούμενης ακτινοβολίας είναι ανάλογο του dx και του I σύμφωνα με τη σχέση :

$$Di = - \mu * I * dx$$

έτσι ώστε

$$I = I_0 * e^{-\mu x}$$

Η μέτρηση της έντασης I δίνει τη δυνατότητα να καθοριστεί μια τιμή για το μ . Μεταβολές στην ένταση των ακτινών γ εντοπίζονται από ανιχνευτές όπως η συσκευή Geiger. Το βασικό πλεονέκτημα των ακτινών γ σε σχέση με τις ακτίνες x είναι ότι μπορούν να παραχθούν υψηλής ενέργειας ακτινοβολίες χωρίς ακριβό και επικίνδυνο εξοπλισμό υψηλής ηλεκτρικής τάσης. Το μειονέκτημά τους είναι ότι δε μπορούν να απενεργοποιηθούν και έτσι αποτελούν ένα μόνιμο κίνδυνο [15].

- (i) ραδιομετρία ακτινών γ : Έχει παρατηρηθεί ότι η απορρόφηση των ακτινών γ είναι σχεδόν ανάλογη της πυκνότητας του σκυροδέματος και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένας δείκτης πυκνότητας. Τα εργαλεία είναι είτε τύπου μεταβίβασης με μια πηγή και έναν ανιχνευτή σε κάθε μια από τις πλευρές του σκυροδέματος είτε τύπου επανασκέδασης όπου πηγή και ανιχνευτής (συχνά είναι μια μονάδα) τοποθετούνται στην ίδια επιφάνεια του σκυροδέματος.

Η μέθοδος έχει ικανότητα να μετράει τη πυκνότητα του φρέσκο-τοποθετούμενου σκυροδέματος σαν μια διαδικασία ποιοτικής εξακρίβωσης, ώστε να εντοπίζονται κακοτεχνίες τη στιγμή που οι διορθωτικές επεμβάσεις δεν έχουν μεγάλο κόστος. Έχει παρατηρηθεί ευστοχία της τάξεως του 1% για τη πυκνότητα φρέσκο-τοποθετούμενου σκυροδέματος σε βάθος 100 mm από την επιφάνεια [16].

- (ii) ραδιογραφία ακτινών γ : Ο κανόνας της ραδιογραφίας είναι η παρατήρηση της διαφοράς στην απόσβεση μιας επικείμενης ακτινοβολίας που παράγεται από μεταβολές στη πυκνότητα και στο πάχος του υλικού. Η τεχνική που χρησιμοποιείται είναι να επιτρέπεται σε ακτίνες γ , που παράγονται από μια κατάλληλη ραδιενεργή πηγή, να περάσουν μέσα από το σκυρόδεμα και να παρατηρείται η ένταση της επείγουσας ακτινοβολίας σε film X-ray. Η δραστηριότητα της πηγής καθορίζει τον απαιτούμενο χρόνο έκθεσης, E :

$$E \text{ (in hours)} = \frac{SFf^2}{A}$$

Όπου

- f είναι η απόσταση του φιλμ από την πηγή
- A η δραστηριότητα της πηγής
- S το πάχος του σκυροδέματος
- F ο παράγοντας φιλμ

Ξεκάθαρος καθορισμός του φιλμ απαιτεί ένα λογικό χρόνο έκθεσης και εξαρτάται επίσης από το μέγεθος της πηγής, την απόσταση μεταξύ του αντικείμενου και του φιλμ, και την απόσταση της πηγής από το αντικείμενο [15].

Οι χρόνοι έκθεσης μεγαλώνουν όταν το πάχος του σκυροδέματος ξεπερνάει τα 450 mm, ωστόσο, πολλές εφαρμογές βρίσκονται μέσα σε αυτό το εύρος. Χρήσεις εμπεριέχουν τον εντοπισμό κενών σε προεντεταμένους σωλήνες και στην επί τόπου εξέταση σκυροδέματος ή σε αρθρώσεις από ασβεστοκονίαμα σε προκατασκευασμένα στοιχεία. Ο Fackler [17] χρησιμοποίησε τη μέθοδο για να παρατηρήσει τη συμπεριφορά των αδρανών κατά τη διάρκεια συμπίεσης και δόνησης. Σε περίπτωση που η ακτινοβολία γ παράγεται από βήτατρον (Betatron), μπορούν να ελεγχθούν υλικά πάχους μέχρι και 500 mm.

2.5.3. Μέθοδος Μαγνητικών Σωματιδίων (magnetic partial testing)

Για τη διάγνωση μη ορατών με το μάτι ρωγμών, μικρό-σχισμών από σκουριά κλπ, που βρίσκονται ή απολήγουν στις εξωτερικές επιφάνειες των υλικών χρησιμοποιείται η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων. Το υλικό, που πρέπει να έχει φερομαγνητικές ιδιότητες, υποβάλλεται σε μια μαγνητική ροή, αφού προηγουμένως επικαλυφθεί με ένα κατάλληλο αιώρημα σκόνης οξειδίων του σιδήρου. Οι επιφανειακές ασυνέχειες, που δημιουργούν ασυνέχειες του μαγνητικού πεδίου καθίστανται ορατές λόγω

ακριβώς της υπέρξεως του μαγνητικού αιωρήματος. Με τη μέθοδο αυτή εντοπίζονται επιφανειακές ασυνέχειες με πλάτος μέχρι και 0,001 mm.

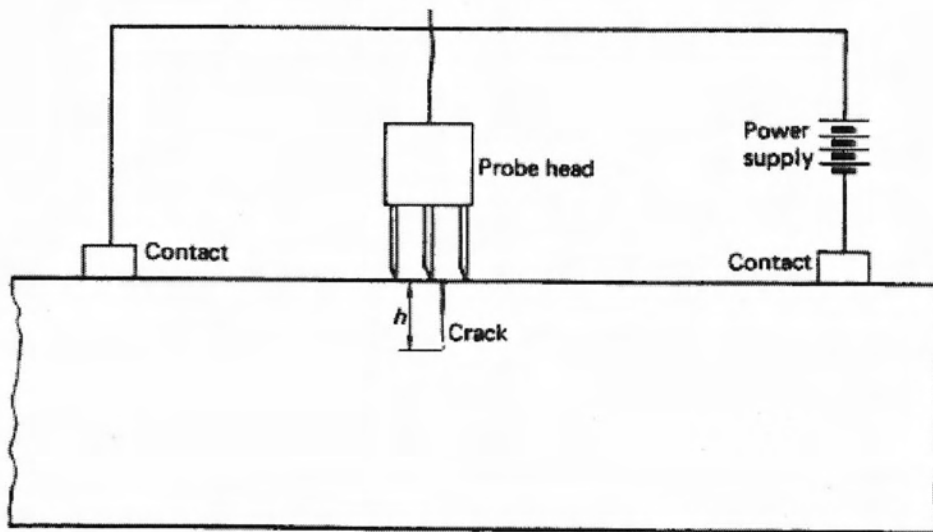
2.6. Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι

2.6.1. Ηλεκτρικές Μέθοδοι

Η ηλεκτρική μέθοδος για το καθορισμό της αναλογίας της υγρασίας στο σκυρόδεμα βασίζεται στις αλλαγές στις διηλεκτρικές ιδιότητες όταν αλλάζει η αναλογία υγρασίας. Με τη δημιουργία μιας γνωστής εναλλασσόμενης διαφοράς δυναμικού ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια τα οποία βρίσκονται σε επαφή με το σκυρόδεμα, μπορεί να καθοριστεί η διηλεκτρική σταθερά. Αφού η διηλεκτρική σταθερά για το νερό είναι περίπου 15 φορές μεγαλύτερη από αυτή των άλλων συστατικών του σκυροδέματος σε συχνότητες έως 80 MHz, η μέθοδος παρέχει μια ακριβή μέτρηση της αναλογίας υγρασίας. Μια εμπορική εφαρμογή στη Γαλλία, βασισμένη σε αυτό το κανόνα, χρησιμοποιήθηκε για το καθορισμό της αναλογίας υγρασίας σε γύψινους τοίχους για να βεβαιωθούν τότε μπορούν να βαφούν. Μια άλλη μέθοδος βασισμένη σε διηλεκτρικές απώλειες που προέρχονται από το νερό σε συχνότητες μικροκυμάτων εξελίχθηκε σε πρακτική συσκευή στην Αγγλία [18].

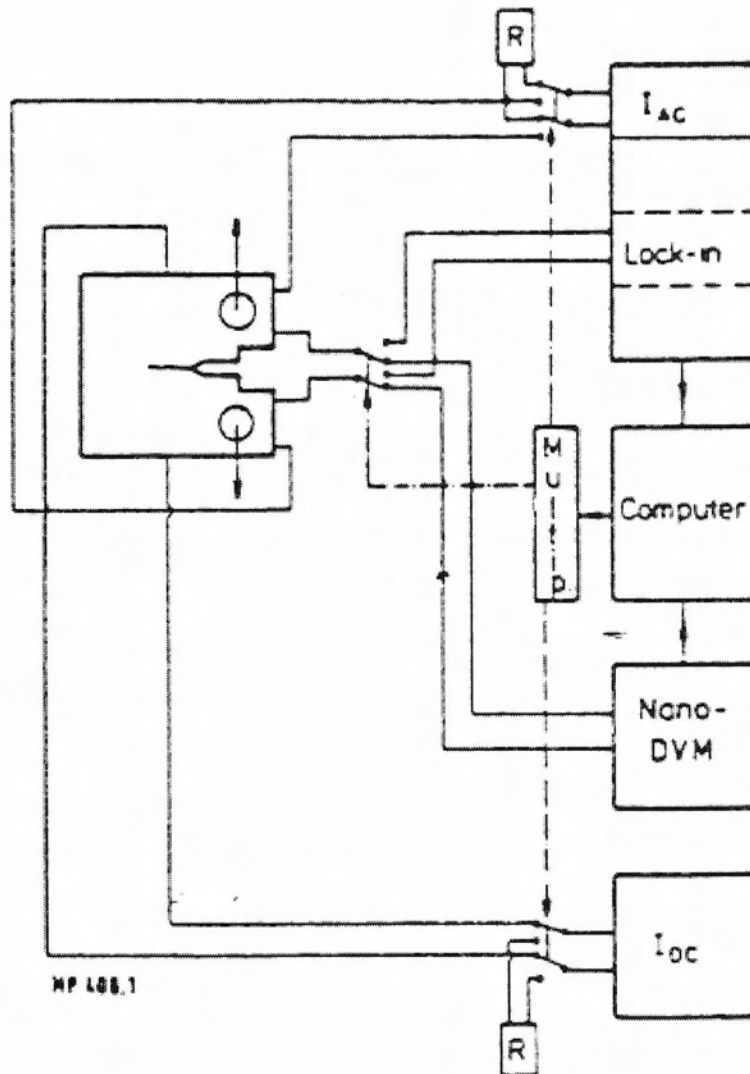
2.6.1.1. Μέθοδος πτώσης δυναμικού

Η μέθοδος λειτουργεί με τη μέτρηση της τάσης στην επιφάνεια του μετάλλου, το οποίο διαρρέεται από σταθερό DC ή εναλλασσόμενο AC ρεύμα. Η παρουσία ρωγμών, ή άλλων ατελειών, προκαλεί μεταβολές στη αγωγιμότητα του υλικού και αντίστοιχα στη μετρούμενη τάση.



Σχήμα 2.12: Μέθοδος πτώσης δυναμικού.

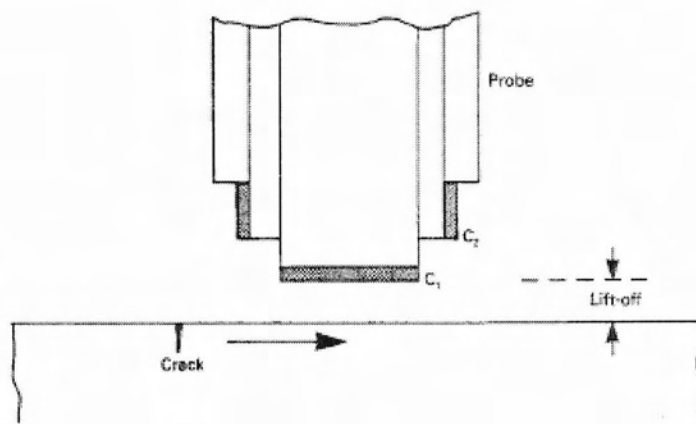
Η ίδια συσκευή που χρησιμοποιείται για την παροχή του ρεύματος και τη μέτρηση της τάσης μπορεί να μετατρέπει τις μεταβολές της πτώσης δυναμικού σε μεταβολές του μήκους της ρωγμής, εφόσον φυσικά έχει προηγηθεί η κατάλληλη ρύθμιση. Η χρήση DC ρεύματος προσφέρει ευκολότερη τοποθέτηση και ρύθμιση, καθώς και μεγαλύτερη συσχέτιση τάσης και μήκους ρωγμής. Από την άλλη η χρήση AC ρεύματος απαιτεί πολύ μικρότερη ισχύ, διότι χάρις στο επιδερμικό φαινόμενο το ρεύμα κυκλοφορεί μόνο στην επιφάνεια του μετάλλου, έτσι δεν επηρεάζει την θερμοκρασία του δοκιμίου και επιπλέον επιτρέπει τη χρήση μιας πληθώρας τεχνικών για τη μείωση του θορύβου. Οι δύο τεχνικές των DC και AC ρευμάτων μπορούν επίσης να εφαρμοστούν ταυτόχρονα ώστε να συνδυάζονται τα προτερήματά τους και να βελτιώνονται τα αποτελέσματα.



Σχήμα 2.13: Διάγραμμα συνδεσμολογίας της μεθόδου πτώσης δυναμικού.

2.6.1.2. Ρεύματα Eddy

Στην μέθοδο ρευμάτων Eddy χρησιμοποιείται ένα ζεύγος πηνίων που τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα συγκεκριμένης συχνότητας. Όταν αυτά βρεθούν κοντά στην επιφάνεια του μεταλλικού υλικού παράγουν σε αυτήν ρεύματα Eddy τα οποία με τη σειρά τους δημιουργούν πεδίο που επιδρά στα πηνία και επηρεάζει το ρεύμα που τα διαρρέει. Οι αλλαγές αυτές μας πληροφορούν για την κατάσταση της επιφανείας του υλικού.

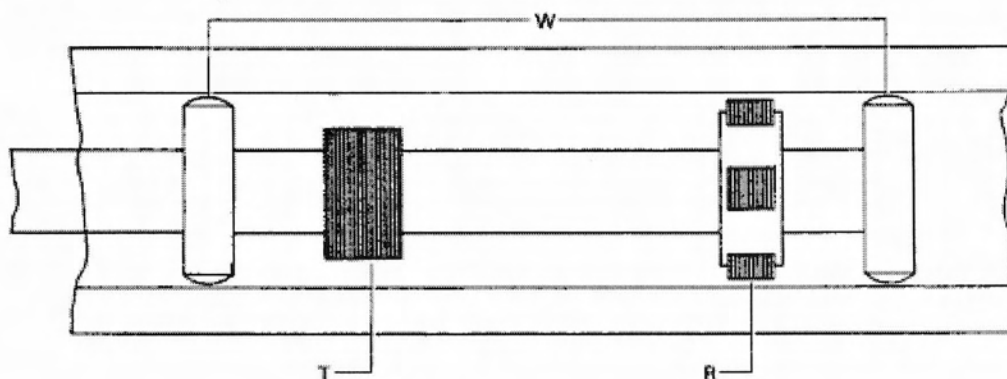


Σχήμα 2.14: Μέθοδος ρευμάτων Eddy.

Η βασική τεχνική είναι να μετακινείται η κεφαλή με τα πηνία πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και να καταγράφεται κάθε αλλαγή στο ρεύμα και τη τάση των πηνίων. Όταν στην επιφάνεια υπάρχουν ατέλειες, τα πεδία των ρευμάτων Eddy αλλοιώνονται και επηρεάζουν διαφορετικά το ρεύμα των πηνίων.

Μακρινό Πεδίο Ρευμάτων Eddy (Remote field testing - RFT)

Μια παραλλαγή της μεθόδου είναι η μέτρηση του μακρινού πεδίου των ρευμάτων Eddy που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο μικρών μεταλλικών σωλήνων με εσωτερικό καθετήρα. Η τεχνική παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα καθώς εντοπίζει με την ίδια ευαισθησία εσωτερικά και εξωτερικά ελαττώματα του τοιχώματος του σωλήνα. Χαρακτηριστικό της τεχνικής είναι ότι τα δύο πηνία είναι απομακρυσμένα, και, το ένα χρησιμοποιείται σαν πομπός και το άλλο σαν δέκτης.



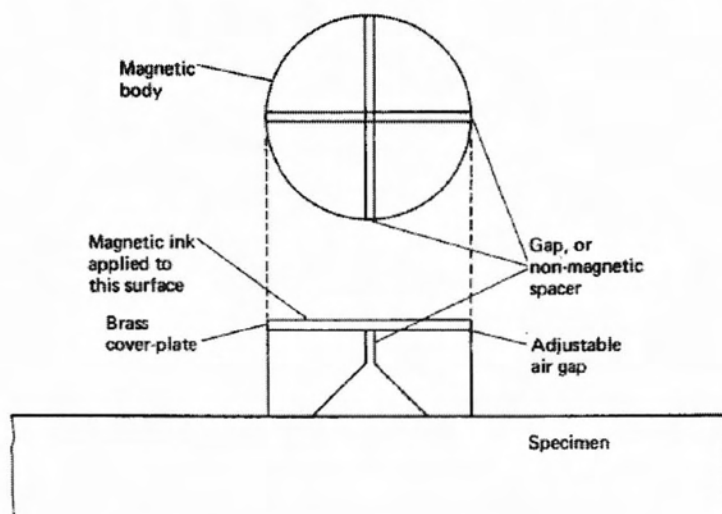
Σχήμα 2.15: Έλεγχος σωλήνα με καθετήρα ρευμάτων Eddy μακρινού πεδίου.

2.6.2. Μαγνητικές Μέθοδοι

Απλές συσκευές γνωστές σαν συσκευές μέτρησης επικάλυψης οπλισμού δημιουργήθηκαν στην Αγγλία και την Ολλανδία βασισμένες στην απροθυμία ενός μαγνητικού κυκλώματος να εντοπίσει την θέση ενός οπλισμού και να καθορίσει τις διαστάσεις του. Πρόσφατα, διαθέσιμα όργανα μπορούν να εντοπίσουν οπλισμό έως και 75 mm από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Επειδή όμως ο ρυθμός της αλλαγής των επηρεαζόμενων είναι αισθητά μη γραμμικός, λαμβάνοντας υπ'όψιν την απόσταση του αισθητήρα από τον οπλισμό, η ευαισθησία των αποτελεσμάτων μειώνεται για τις μεγαλύτερες τιμές κάλυψης.

2.6.2.1. Έλεγχος με Μαγνητικά Ρινίδια

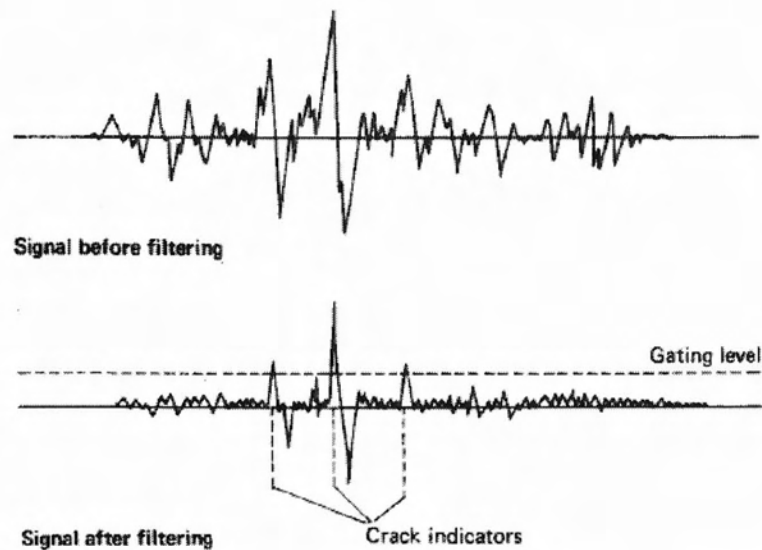
Τα υπό έλεγχο δοκίμια μαγνητίζονται κατάλληλα και στην επιφάνειά τους τοποθετούνται σιδηρομαγνητικά ρινίδια. Τα ρινίδια έλκονται και συγκεντρώνονται στα σημεία απώλειας της ροής, κάνοντας τις ατέλειες ορατές με γυμνό μάτι. Τα ρινίδια τοποθετούνται στην επιφάνεια ελέγχου είτε σαν χρωματιστό μαγνητικό μελάνι (magnetic ink) ή σαν μαγνητική σκόνη (magnetic particles).



Σχήμα 2.16: Έλεγχος με μαγνητικά ρινίδια.

2.6.2.2. Μαγνητογραφία

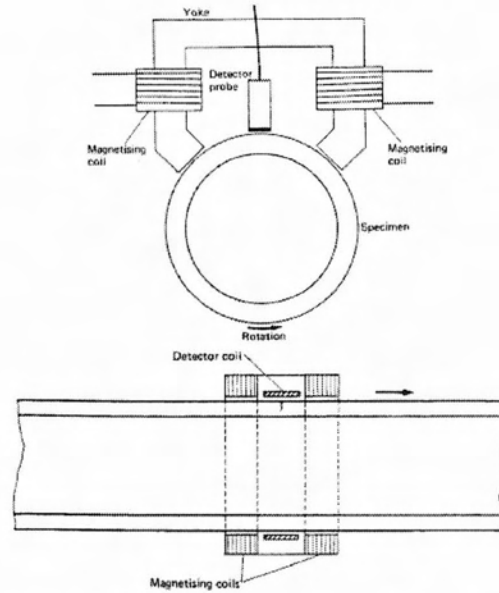
Εναλλακτικά η μέτρηση της μαγνητικής ροής μπορεί να γίνει με ένα είδος μαγνητοταινίας η οποία πιέζεται στην επιφάνεια του μαγνητισμένου υλικού. Στη συνέχεια η ταινία αφαιρείται για επεξεργασία και ανάλυση των ενδείξεων. Η διαδικασία αυτή λέγεται μαγνητογραφία αλλά δεν είναι ακόμα ιδιαίτερα διαδεδομένη.



Σχήμα 2.17: Μαγνητογραφικά σήματα πριν και μετά το φιλτράρισμά τους.

2.6.2.3. Εντοπισμός Απωλειών Μαγνητικής Ροής

Οι απώλειες μαγνητικής ροής μπορούν να καταγραφούν και με αισθητήρες που φέρουν πηνία ή μαγνητοδιόδους. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για σωλήνες, αγωγούς, δεξαμενές και συρματόσχοινα.



Σχήμα 2.18: Έλεγχος μαγνητικών απωλειών α) περιστροφικά και β) κατά μήκος του αγωγού.

2.6.2.4. Έλεγχος Θορύβου Barkhausen

Οι ατέλειες στη κρυσταλλική δομή ενός υλικού, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τις μηχανικές ιδιότητές του, είναι οι ίδιες που επηρεάζουν και τις μαγνητικές του ιδιότητες. Η μεταξύ τους σχέση δεν έχει γίνει ακόμη πλήρως κατανοητή αλλά διαπιστώθηκε ότι οι μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και των βημάτων Barkhausen παρέχουν πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες. Ο μαγνητισμός των υλικών συμβαίνει με μια σειρά μικρών βημάτων από τον ένα κόκκο στον άλλο. Αν συνδέσουμε το πηνίο μαγνητισμού με ένα μεγάφωνο, τα βήματα αυτά ακούγονται σαν μια σειρά από κλικ και συνθέτουν ένα θόρυβο (ένα ανάλογο φαινόμενο είναι η μαγνητοακουστική εκπομπή). Ο θόρυβος Barkhausen είναι ευαίσθητος στη παρουσία τάσεων, ρωγμών, μικρό-ατελειών, θερμικής κατεργασίας και πλαστικής παραμόρφωσης, και παρουσιάζει αιχμές και ακραίες τιμές που βοηθούν στον εντοπισμό τους.

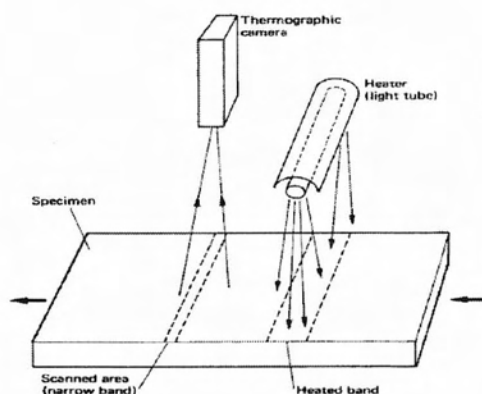
2.7. Θερμικές Μέθοδοι

2.7.1. Μέθοδος Θερμικών Εκπομπών

Όταν ένα στερεό φορτίζεται με τάσεις αρκούντως υψηλές, ένα μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια που εκλύεται στο περιβάλλον. Το φαινόμενο αυτό το καλούμε Θερμική Εκπομπή (Thermal Emission). Η θερμική εκπομπή στην περιοχή γύρω από μια ρωγμή μπορεί να μετρηθεί με ειδικούς θερμικούς αισθητήρες (thermistors). Οι θερμικοί αισθητήρες παρουσιάζουν αντίσταση 30-100 k. στους 25° C και είναι τόσο ευαίσθητοι που επηρεάζονται ακόμη και από την παρουσία ανθρώπων ή άλλων συσκευών. Για το λόγο αυτό η όλη διάταξη πρέπει να είναι απομονωμένη από το περιβάλλον και τις πιθανές εξωτερικές αλλαγές θερμοκρασίας.

2.7.2. Θερμογραφική Μέθοδος

Η θερμογραφική μέθοδος χρησιμοποιεί κάμερα υπέρυθρων ακτίνων για τη μέτρηση της κατανομής της θερμοκρασίας σε μια επιφάνεια. Μπορεί να λειτουργήσει σαν παθητική τεχνική όπως η μέθοδος της θερμικής εκπομπής, ή, σαν ενεργητική τεχνική χρησιμοποιώντας θερμικούς παλμούς (Laser) για τη θέρμανση της επιφάνειας. Η βασική ιδέα είναι ότι εφόσον το υλικό είναι ομοιογενές, η θερμότητα θα διαδοθεί ομοιόμορφα, ενώ αν υπάρχουν ελαττώματα η διάχυση της θερμότητας θα αλλοιωθεί.



Σχήμα 2.19: Θερμογραφικός έλεγχος επιφάνειας.

2.8. Μέθοδοι διάδοσης τασικών κυμάτων

2.8.1. Έλεγχος αντίστασης

Ο εξοπλισμός της μεθόδου αυτής αποτελείται από 4 ηλεκτρόδια, τα οποία τοποθετούνται στην επιφάνεια του σκυροδέματος σε ισοδύναμες αποστάσεις. Ένα χαμηλής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα περνάει ανάμεσα από τα 2 εξωτερικά ηλεκτρόδια ενώ υπολογίζεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα 2 εσωτερικά. Η φαινομενική αντίσταση εκφράζεται μέσω του τύπου :

$$\rho = 2\pi aV/I$$

όπου

V η διαφορά δυναμικού

I το εφαρμοζόμενο ρεύμα

a η απόσταση των ηλεκτροδίων

Η μέθοδος αυτή είναι μία απλή, γρήγορη και φθηνή μη καταστροφική μέθοδος που δίνει πληροφορίες σχετικά με τη διάβρωση. Η απόσταση μεταξύ των 4 ανιχνευτών καθορίζει το πεδίο στο οποίο θα γίνει ο έλεγχος διάβρωσης. Είναι γενικώς αποδεκτό ότι η ζώνη του σκυροδέματος που ανιχνεύεται είναι ισοδύναμη με την απόσταση των ηλεκτροδίων. Χρησιμοποιώντας μεγάλες αποστάσεις θα έχουμε σαν αποτέλεσμα ανακρίβειας λόγω του ηλεκτρικού πεδίου που προκαλείται στο υπό εξέταση στοιχείο. Επιπλέον, ανακρίβειες μπορεί να προκληθούν και από την επιρροή του χάλυβα με τη χρησιμοποίηση μεγάλων διαστημάτων. Συνήθως υιοθετούμε μια απόσταση 50mm ώστε να μην έχουμε μεγάλη διασπορά αλλά και να μην έχουμε μεγάλες ανακρίβειες.

2.8.2. Μέθοδος Ακουστικής Πρόσκρουσης (Impact Echo Method)

Είναι μια μη-καταστροφική μέθοδος που βασίζεται στη εισαγωγή και μετάδοση κυμάτων σε ένα στοιχείο. Εισάγουμε ένα κύμα μέσω μηχανικής πρόσκρουσης στη μια επιφάνεια του στοιχείου, το οποίο αντανακλά και διαχέεται μέσα στο στοιχείο. Αυτό που κάνουμε είναι να παρατηρούμε τη μετακίνηση της επιφάνειας που προκαλείται στο σημείο της πρόσκρουσης από τα ανακλώμενα κύματα και να ελέγχουμε τη συχνότητα των ανακλάσεων αυτών. Με βάση αυτά τα στοιχεία και γνωρίζοντας το πάχος του στοιχείου υπολογίζουμε την ταχύτητα μετάδοσης του κύματος στο εσωτερικό του στοιχείου. Σύμφωνα με τη γενική μεθοδολογία θα δημιουργηθεί με αυτό τον τρόπο μια σχέση μεταξύ της ταχύτητας και της αντοχής του σκυροδέματος, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την υφιστάμενη κατασκευή.

Υπάρχουν 3 είδη κυμάτων που μπορούν να παραχθούν από το σημείο πρόσκρουσης της επιφάνειας ενός ελαστικού στερεού και είναι τα επιφανειακά κύματα (R waves), τα εγκάρσια κύματα (S waves) και τα διαμήκη κύματα (P waves). Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό της μετακίνησης της επιφάνειας λόγω μετάδοσης των κυμάτων P. Σε ένα απείρως ελαστικό στερεό η ταχύτητα του κύματος εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας E , από τον συντελεστή Poisson ν και από την πυκνότητα του στοιχείου και δίνεται από τη σχέση

$$C_{P1} = \left[\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho} \right]^{1/2}$$

Σε ένα ραβδωτό στοιχείο η ταχύτητα είναι μικρότερη και δίνεται από τη σχέση

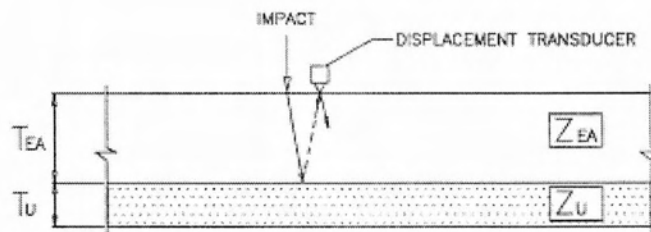
$$C_{P2} = \left[\frac{E}{\rho} \right]^{1/2}$$

Συγκριτικά με τα υπερηχητικά κύματα, τα κύματα που παράγονται από πρόσκρουση έχουν χαμηλότερη συχνότητα [19].

Όταν ένα κύμα συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ 2 υλικών με διαφορετική ακουστική αντίσταση πραγματοποιούνται τα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης. Οι πιέσεις που σχετίζονται με τα ανακλώμενα και τα διαθλώμενα κύματα εξαρτώνται από τη γωνία με την οποία το κύμα προσπίπτει στην επιφάνεια και από την αντίσταση των 2 υλικών. Αν υποθέσουμε ότι ένα κύμα P μεταδίδεται σε ένα υλικό με αντίσταση Z_1 και συναντήσει ένα υλικό με αντίσταση Z_2 τότε οι πιέσεις που σχετίζονται με την ανάκλαση δίνονται από τον τύπο

$$P_R = P_I [(Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)]$$

Όπου P_I και P_R οι πιέσεις των κυμάτων που προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια και ανακλώνται από αυτή, αντίστοιχα. Αν $Z_1 > Z_2$, τότε το ανακλώμενο κύμα θα έχει μια αλλαγή στο σήμα σε σχέση με αυτό που προσπίπτει. Αν όμως $Z_2 > Z_1$, τότε θα έχουν το ίδιο σήμα.[20].



Σχήμα 2.20 : Πλάκα σκυροδέματος σε έλεγχο με ακουστική πρόσκρουση.

Στο Σχήμα 2.20 βλέπουμε την εφαρμογή της μεθόδου που αναλύουμε. Στην περίπτωση αυτή η ακουστική αντίσταση του μικρής ηλικίας δοκιμίου πλάκας έχει αντίσταση Z_{EA} μεγαλύτερη από αυτή του υλικού που βρίσκεται στο κάτω μέρος (Z_U). Το P-WAVE που παράγουμε μέσω πρόσκρουσης μεταδίδεται στο εσωτερικό του δοκιμίου και όταν συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια θα έχουμε ανάκλαση. Αφού $Z_{EA} > Z_U$ οι πιέσεις του κύματος που αντανακλάται αλλάζουν τιμή και το κύμα που προσπίπτει στην επιφάνεια ανακλάται ως τασικό κύμα. Το ανακλώμενο τασικό κύμα επιστρέφει στην επιφάνεια της πλάκας όπου ανακλάται και πάλι και επιστρέφει στο δοκίμιο ως διαμήκες κύμα. Το σήμα της πίεσης του κύματος που ανακλάται αλλάζει και πάλι αφού η ακουστική αντίσταση του δοκιμίου είναι μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Η διαδικασία ανάκλασης του κύματος ανάμεσα στις 2 επιφάνειες της

πλακάς συνεχίζεται μέχρι να αποσβεστεί πλήρως .Κάθε άφιξη του κύματος στην επιφάνεια του δοκιμίου προκαλεί μια μετακίνηση της επιφάνειας σκυροδέματος.

Το ιστορικό των μετακινήσεων της επιφάνειας διατηρείται από έναν πομπό παραμόρφωσης, ο οποίος τοποθετείται δίπλα στο σημείο παραγωγής του κύματος. Η διαδρομή που κάνει το κύμα σε μια πετυχημένη άφιξη στο πομπό είναι 2 φορές το πάχος του δοκιμίου ($2 \cdot T_{EA}$) και ο χρόνος που χρειάζεται για να διανύσει αυτή τη διαδρομή είναι Δt . Γνωρίζοντας αυτά υπολογίζουμε απλά την ταχύτητα του κύματος μέσω της σχέσης :

$$C_p = 2T_{EA} / \Delta t$$

Επιπλέον συνδέουμε την ταχύτητα του κύματος με την συχνότητα των ανακλάσεων μέσω της σχέσης

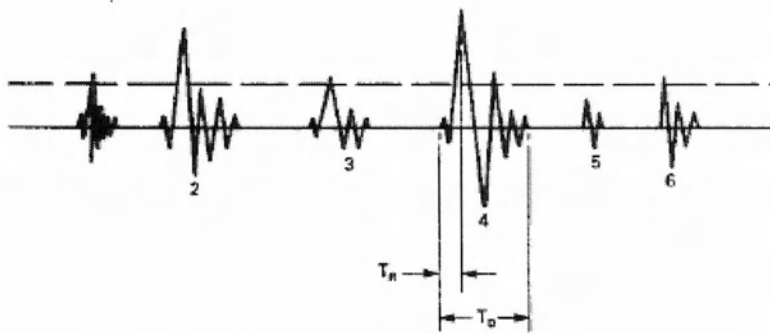
$$C_p = 2T_{EA} f_p$$

αφού γνωρίζουμε ότι

$$\Delta t = 1/f_p \quad [21].$$

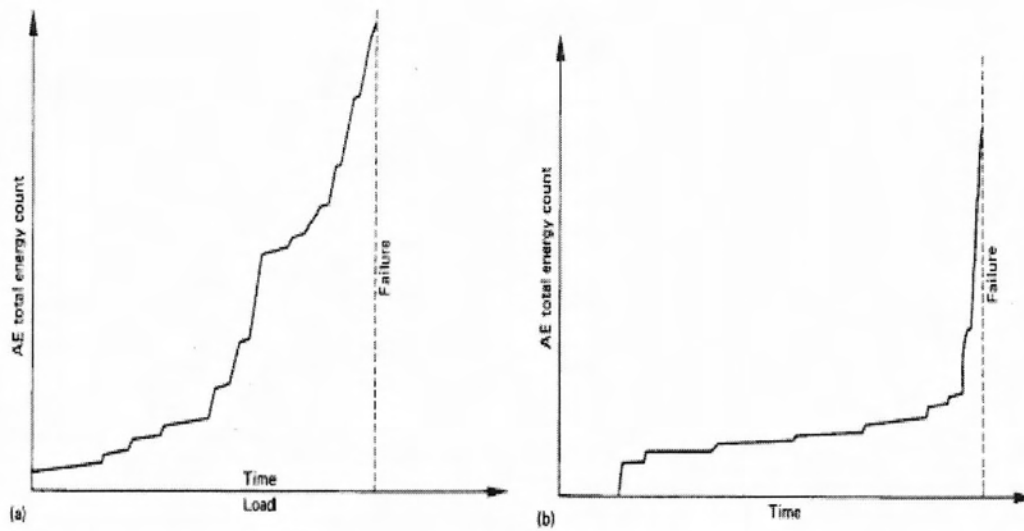
2.8.3. Μέθοδοι Ακουστικών Εκπομπών

Όταν ένα στερεό φορτίζεται με τάσεις αρκούντως υψηλές, τότε το υλικό παράγει ήχους με τη μορφή διακριτών παλμών. Το φαινόμενο αυτό το καλούμε Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission – AE) ή Εκπομπή Κυμάτων Τάσης (Stress-Wave Emission – SWE). Η Ακουστική Εκπομπή μπορεί να καλύπτει και το ακουστικό φάσμα αλλά κυρίως πρόκειται για υπερήχους με συχνότητες από 30 kHz έως 30 MHz. Κύρια χαρακτηριστικά των παλμών Ακουστικής Εκπομπής είναι ο χρόνος ανόδου T_R , η συνολική διάρκεια T_D και το πλάτος τους όταν ξεπερνά ένα ελάχιστο όριο (threshold). Η ρύθμιση του ελάχιστου ορίου είναι σημαντική για την επιλογή ή απόρριψη των παλμών (π.χ. στην επόμενη εικόνα, ο παλμός 5 αγνοείται ενώ ο 4 υπολογίζεται δυο φορές).



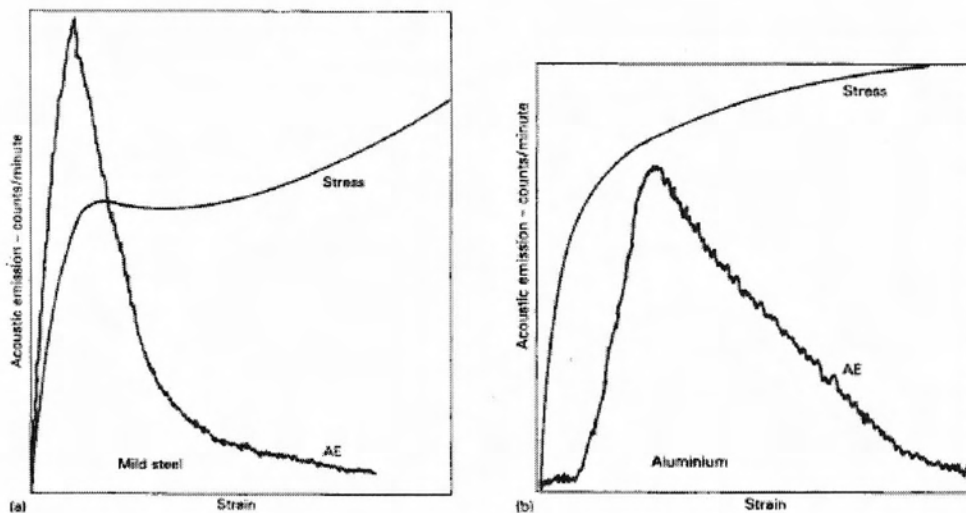
Σχήμα 2.21 : Σειρά παλμών ακουστικής εκπομπής.

Η τελική επιλογή της παρουσίας ή όχι ενός παλμού είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία και στην οποία συμμετέχουν εκτός από ειδικά κυκλώματα φίλτρων και προγράμματα Η/Υ που υλοποιούν τεχνικές Θεωρίας Αποφάσεων και Αναγνώρισης Προτύπων. Οι πιο βασικές παράμετροι που μελετώνται γραφικά είναι η συνολική ενέργεια των παλμών και το πλήθος των αφικνούμενων παλμών στη μονάδα του χρόνου. Οι παράμετροι αυτοί της AE συγκρίνονται και συνδυάζονται με άλλες παραμέτρους της κόπωσης ώστε να προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Συσχετίζοντας π.χ., την συνολική ενέργεια των παλμών με τον χρόνο ή τους κύκλους φόρτισης προκύπτουν διαγράμματα τα οποία μπορούν να συγκριθούν με τα διαγράμματα της μορφής $a-N$ (μήκους ρωγμής – κύκλων φόρτισης).



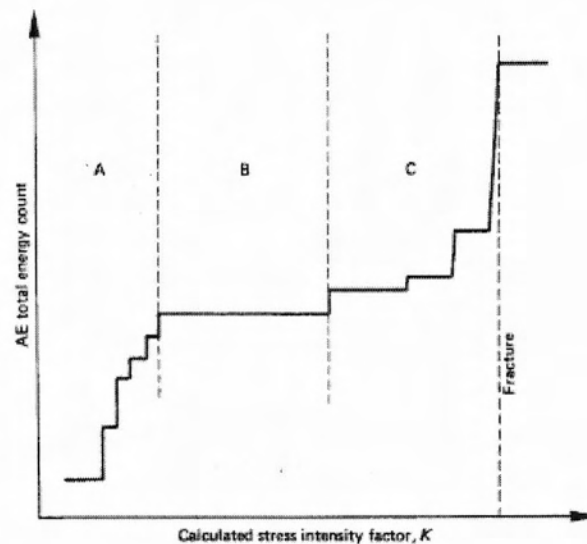
Σχήμα 2.22: Διάγραμμα ενέργειας ΑΕ προς χρόνο φόρτισης (α) για «θορυβώδη» υλικά και (β) για «ήσυχα» υλικά.

Αντίστοιχα, συσχετίζοντας το πλήθος των αφικνούμενων παλμών ανά λεπτό με τη παραμόρφωση του υλικού, μπορούμε να σχεδιάσουμε το διάγραμμα τους μαζί με το διάγραμμα σ - ϵ (τάσης-παραμόρφωσης) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.23:



Σχήμα 2.23: Διάγραμμα πλήθους παλμών ΑΕ συναρτήσει της ανοιγμένης παραμόρφωσης ϵ για (α) ατσάλι και (β) αλουμίνιο.

Τέλος, αν σχεδιάσουμε τη συνολική ενέργεια των παλμών ΑΕ ως προς τον συντελεστή έντασης τάσεων K προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα όπου φαίνεται ότι υπάρχει μια αύξηση των εκπομπών ΑΕ όταν το K πλησιάζει τη δυσθραυστότητα (fracture toughness K_{IC}).



Σχήμα 2.24: Διάγραμμα ενέργειας ΑΕ προς συντελεστή K

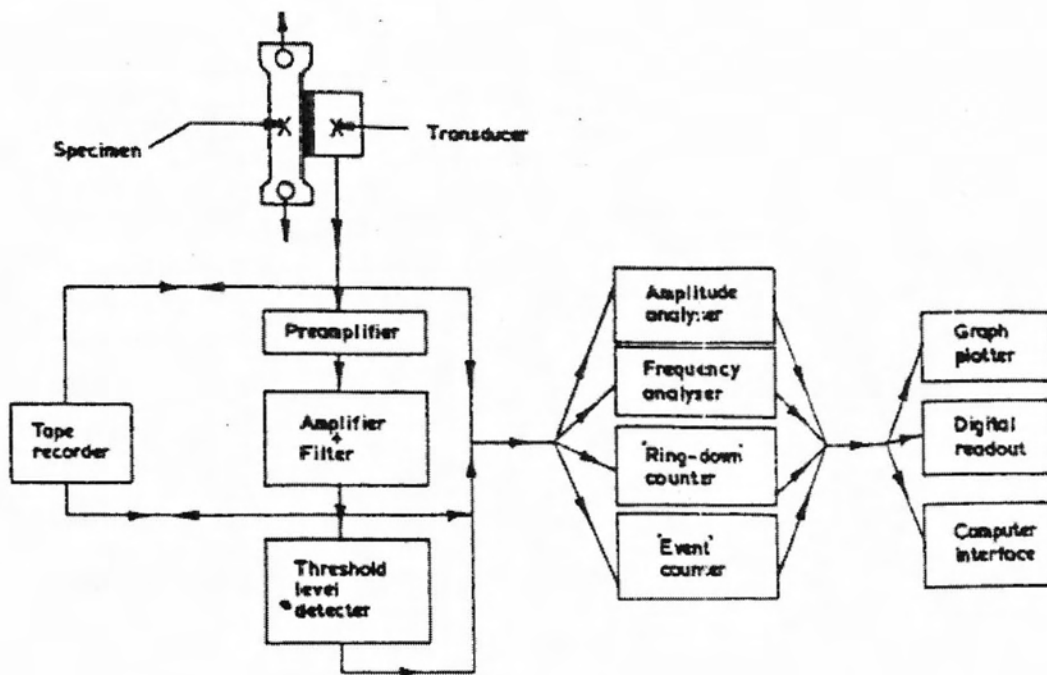
Εντοπισμός μιας πηγής ΑΕ

Μια από τις ευρύτερα διαδεδομένες εφαρμογές της ΑΕ είναι ο εντοπισμός της θέσης του ελαττώματος ή της ατέλειας που παράγει τους παλμούς ΑΕ. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί πολλούς αισθητήρες υπερήχων (10-20). Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην επιφάνεια του υπό εξέταση αντικειμένου σε απόσταση μεταξύ τους ώστε να καλύπτουν όλο το αντικείμενο. Η χρονική συσχέτιση των σημάτων τους επιτρέπει τον γεωμετρικό προσδιορισμό της θέσης της πηγής κάθε παλμού ΑΕ. Για ατέλειες που βρίσκονται σε ακτίνα περίπου 1m από τους αισθητήρες, μπορεί να εντοπιστεί η θέση τους με ακρίβεια εκατοστού (1 cm).

Υπέρ και Κατά της Μεθόδου ΑΕ

Η μέθοδος των ΑΕ είναι μια από τις νεότερες μεθόδους ΜΚΕ. Έχει ήδη περάσει τα βασικά στάδια ανάπτυξης και ήδη έχουν δοθεί οι πρώτες τυποποιήσεις από την ASTM με πιο σημαντικό το ASTM.E.750. Τα κυριότερα προτερήματα της μεθόδου είναι ότι: μπορεί να καλύψει μεγάλες επιφάνειες και κατασκευές, μας δείχνει ότι

υπάρχουν ατέλειες που επεκτείνονται, εντοπίζει τις ατέλειες, τις εντοπίζει ακόμη και σε απρόσιτα σημεία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενώ η κατασκευή μας λειτουργεί (on-line). Η μέθοδος έχει φυσικά και μειονεκτήματα όπως: δεν εκπέμπονται παλμοί ΑΕ από όλες τις ατέλειες του υλικού, η απόδοσή της εξαρτάται από τη μέθοδο φόρτισης της κατασκευής και από την ύπαρξη θορύβου, δεν καθορίζει το μέγεθος της ατέλειας και δεν είναι ακόμη πλήρως τυποποιημένη.



Σχήμα 2.25: Συνδεσμολογία μεθόδου ΑΕ.

2.9. Άλλες Μέθοδοι

2.9.1. Έλεγχοι Διαρροής

Πολλές συσκευές σχεδιάζονται να λειτουργούν με υψηλή εσωτερική πίεση και κατά συνέπεια πρέπει να ελέγχονται για τυχόν διαρροές. Με τη μέθοδο εντοπισμού διαρροών διοχετεύεται αέριο ή υγρό υπό πίεση στη συσκευή και ελέγχουμε την παρουσία του στην άλλη πλευρά του τοιχώματος καθώς και τυχόν μειώσεις στη πίεση του. Υπάρχουν πολλές τεχνικές να πραγματοποιηθεί αυτή η δοκιμή. Σε άλλες διοχετεύεται αέριο ενώ το σώμα είναι βυθισμένο σε υγρό οπότε δημιουργούνται φυσαλίδες (bubble testing), και σε άλλες διοχετεύεται χρωματιστό ή φωσφορίζον υγρό το οποίο εντοπίζεται στην άλλη πλευρά με ειδικό φωτισμό π.χ. υπέρυθρες λυχνίες. Το αέριο που χρησιμοποιείται σήμερα είναι το ήλιο, λόγω της αδρανούς του φύσης. Κάθε τεχνική έχει διαφορετικές προδιαγραφές, ευαισθησία αλλά και κόστος.

2.9.2. Μέθοδος Ωριμότητας

Η μέθοδος της ωριμότητας είναι μία μη-καταστροφική μέθοδος, η οποία χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η επιτόπου αντοχή του σκυροδέματος σε μία κατασκευή, λαμβάνοντας υπ'όψιν τις επιδράσεις της θερμοκρασίας και του χρόνου στην ανάπτυξη της αντοχής του. Ως εκ τούτου, ο μηχανικός θα πρέπει να επιλέγει και άλλες μεθόδους ελέγχου της αντοχής, έτσι ώστε να δύναται να ελέγχει τα αποτελέσματα της μεθόδου της ωριμότητας. Η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι ο βαθμός ενυδάτωσης ενός μίγματος σκυροδέματος, και επομένως η αντοχή του σε οποιαδήποτε ηλικία, εξαρτώνται άμεσα από το θερμοκρασιακό ιστορικό του. Αρχικά, καταγράφεται το θερμοκρασιακό ιστορικό του σκυροδέματος υπό μελέτη (δηλ. τιμές της θερμοκρασίας που αναπτύσσει εσωτερικά ένα στοιχείο σκυροδέματος σε συνάρτηση με το χρόνο), με την βοήθεια ειδικών συσκευών. Στη συνέχεια, με την χρήση συγκεκριμένων μαθηματικών σχέσεων, ποσοτικοποιείται η συνδυαστική επίδραση του χρόνου και της θερμοκρασίας στην αντοχή του σκυροδέματος, με τη μορφή ενός δείκτη, του δείκτη 'ωριμότητας'. Τελικά, η εκτίμηση της αντοχής του εκάστοτε μίγματος σκυροδέματος σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή επιτυγχάνεται

γραφικά μέσα από μια καμπύλη συσχέτισης (η οποία έχει προκύψει εργαστηριακά), η οποία συσχετίζει την θλιπτική αντοχή με τον δείκτη ωριμότητας του μίγματος που μας ενδιαφέρει. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι ο υπολογισμός του δείκτη ωριμότητας μέσα από τις μαθηματικές σχέσεις μπορεί να παραληφθεί, αν υπάρχει στη διάθεση του μηχανικού μία συσκευή που υπολογίζει απευθείας το δείκτη αυτό και ονομάζεται μετρητής της ωριμότητας (maturity meter). Η διάθεση τέτοιων συσκευών, στο εμπόριο, έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια. Η μέθοδος της ωριμότητας περιλαμβάνει τον υπολογισμό τριών παραμέτρων που θεωρούνται κλειδιά: τον χρόνο (με σημείο εκκίνησης της μέτρησής του την έναρξη της σκλήρυνσης), τη θερμοκρασία του σκυροδέματος και τη θλιπτική του αντοχή.

2.9.3. Διεισδυτικό Ραντάρ Εδάφους

Γεωραντάρ (GPR) είναι μια μη-καταστροφική τεχνική με ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στον έλεγχο του σκυροδέματος. Είναι μια χρήσιμη και γρήγορη τεχνική για τον εντοπισμό της έκτασης και του μεγέθους διαφόρων ατελειών στο σκυρόδεμα, ενώ έχει και άλλες εφαρμογές όπως ο υπολογισμός του πάχους του στοιχείου. Το GPR έχει πολλές επιπλέον εφαρμογές όπως:

- καθορισμό του πάχους και της δομής των παγετώνων
- αρχαιολογικές έρευνες
- εντοπισμό θαμμένων αντικειμένων

Τα GPR λειτουργούν με βάση την διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μέσω υλικών με διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ των διηλεκτρικών σταθερών στην διεπιφάνεια δύο υλικών, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που αντικατοπτρίζεται στη διεπαφή. Αντίθετα όσο μικρότερη είναι η διαφορά μεταξύ των διηλεκτρικών σταθερών τόσο μικρότερη ποσότητα αντανακλάται στη διεπιφάνεια. Στην ουσία οι διηλεκτρικές σταθερές λειτουργούν αναλογικά με τις αντιστάσεις των υλικών στη διάδοση κυμάτων μέσα στο υλικό.

Τα ραντάρ έχουν αυτά τα χαρακτηριστικά που τα κάνουν κατάλληλα για ελέγχους σε καταστρώματα γεφυρών και άλλων παρόμοιων κατασκευών . Σε αντίθεση με την υπέρυθρη θερμογραφία , η οποία μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά κάτω από ευμενείς συνθήκες περιβάλλοντος και μόνο , τα ραντάρ δεν υπόκεινται σε τέτοιους περιορισμούς. Δεδομένου ότι τα ραντάρ κάνουν έλεγχο σε όλο το βάθος του στοιχείου γνωρίζουμε ότι είναι τα μόνα στην αγορά που μπορούν να κάνουν επιθεώρηση σε γέφυρες με στρώσεις ασφάλτου . Επιπλέον, κάτω από ευμενείς συνθήκες, μπορούν να εντοπίσουν πιθανή απώλεια συνάφειας μεταξύ των οπλισμών και του σκυροδέματος όχι όμως και πιθανές αποκολλήσεις τσιμέντου.

Με σκοπό να αυξηθεί το βάθος στο οποίο τα ραντάρ θα μπορούσαν να πραγματοποιούν ελέγχους σχεδιάστηκαν ραντάρ με χαμηλές συχνότητες . Αυτό όμως συνεπάγεται και μεγάλα μήκη κύματος , γεγονός που μειώνει την ικανότητα των ραντάρ για εντοπισμό των στόχων . Σύγχρονοι υπολογιστές με παλέτες χρωμάτων μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν για την εν μέρει αντιμετώπιση του προβλήματος, δεδομένου ότι μια σειρά χρωμάτων μπορεί να παραχθεί με στόχο την καλύτερη αντίθεση, έτσι ώστε η ερμηνεία να είναι ευκολότερη. Ο ευκολότερος διαχωρισμός των σημάτων μειώνει σημαντικά την πιθανότητα σφάλματος και κάνει τον εντοπισμό των στόχων ευκολότερο .

Ακόμη και σήμερα η μέθοδος αυτή δεν έχει εξελιχθεί πλήρως και η σωστή χρήση της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία του μηχανικού . Βέβαια, με την συνεχή βελτίωση των λειτουργιών των ηλεκτρονικών υπολογιστών , η μέθοδος αυτή έχει τη δυνατότητα να εκτοξευθεί και να αποτελέσει έναν από τους σημαντικότερους μη-καταστροφικούς ελέγχους.

Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από ελαττώματα όπως η χαμηλή αναλογία σήματος προς θόρυβο αλλά και ο απόηχος των κυμάτων. Τα GPR στοιχεία είναι από πολλές απόψεις παρόμοια με τα δεδομένα που παράγονται από τη σεισμική αντανάκλαση, τεχνική που χρησιμοποιείται στους τομείς του πετρελαίου και φυσικού αερίου. Δεδομένου ότι η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου επενδύει δισεκατομμύρια δολάρια στην ανάπτυξη μεθόδων μεταποίησης για την σεισμική τεχνική, υπάρχουν τεράστιες δυνατότητες για να εφαρμοστούν αυτές οι τεχνικές για τα GPR με ελάχιστη ή μηδαμινή τροποποίηση.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα της μεθόδου δημιουργείται σε περίπτωση που υπάρχει πυκνός οπλισμός χάλυβα στο σκυρόδεμα. Γνωρίζοντας ότι τα κύματα που

μεταδίδονται στο σώμα δεν μπορούν να διέλθουν μέσα από μέταλλα, καθίσταται δύσκολος ο έλεγχος των κατώτερων στρωμάτων του στοιχείου. Μεγάλη προσοχή απαιτείται λοιπόν στην τοποθέτηση των ραντάρ. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου το σήμα αντανακλά πάνω σε μέταλλο και μας δίνει λανθασμένες πληροφορίες, οπότε ο καλός προσδιορισμός της κάθε τοποθεσίας μπορεί να αποτρέψει τέτοιου είδους προβλήματα.

Η μετατροπή του χρόνου σε κλίμακα βάθους μπορεί να γίνει ακριβής καθώς γνωρίζουμε την ταχύτητα του φωτός στο συγκεκριμένο υλικό. Γραμμική μετατροπή είναι αποδεκτή μόνο για ομοιογενή υλικά ενώ σε περίπτωση που το στοιχείο που μελετάμε αποτελείται από διάφορες στρώσεις υλικών, η ταχύτητα του φωτός ποικίλει, πρόβλημα που δεν έχει αντιμετωπιστεί ακόμα.

Η ταχύτητα μετάδοσης μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέθοδο γνωστή και ως “walk – away”, η οποία απαιτεί για την πραγματοποίηση της 2 σειρές κεραιών. Οι κεραιές τοποθετούνται στην κορυφή ενός κατόπτρου στο υπό εξέταση μέλος, με αποτέλεσμα το σήμα να είναι καθαρό. Η απόσταση μεταξύ των κεραιών υπολογίζεται στη συνέχεια μέσω της καθυστέρησης του ανακλώμενου σήματος για να διανύσει αυτήν την απόσταση.

Παρόλο που τα επίπεδα ενέργειας που εκπέμπονται από τα ραντάρ είναι χαμηλά και δεν μπορούν να δημιουργήσουν εύκολα πρόβλημα στους ανθρώπους, καλό είναι να αποφεύγεται η έκθεση τους στην ακτινοβολία. Επιπλέον, πιθανές παρεμβολές από κινητά μπορούν να εμφανιστούν όταν η κεραιά δεν έρχεται σε επαφή με το σκυρόδεμα ή το έδαφος. [22]

2.9.4. Μέτρηση Πάχους Πυκνότητας

Η χρήση ραδιοϊσοτόπων σε μη-καταστροφικούς έλεγχους σκυροδέματος βασίζεται στη μετάδοση ακτινοβολίας γ μέσα σε νωπό ή σκληρυμένο σκυρόδεμα. Όταν ο πομπός και ο δέκτης της ακτινοβολίας βρίσκονται στην ίδια πλευρά του δοκιμίου σκυροδέματος, ένα μέρος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται φτάνει στον ανιχνευτή και προκαλεί ηλεκτρικούς παλμούς. Οι παλμοί αυτοί αποτελούν πληροφορίες για τις διαστάσεις του στοιχείου αλλά και για τα φυσικά χαρακτηριστικά του όπως η πυκνότητα. Αν και αυτή η μέθοδος δεν έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί, η αυξανόμενη

χρήση ραδιοϊσοτόπων για μετρήσεις στην ασφαλτο σημαίνει ότι η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιείται πιο συχνά στο μέλλον.

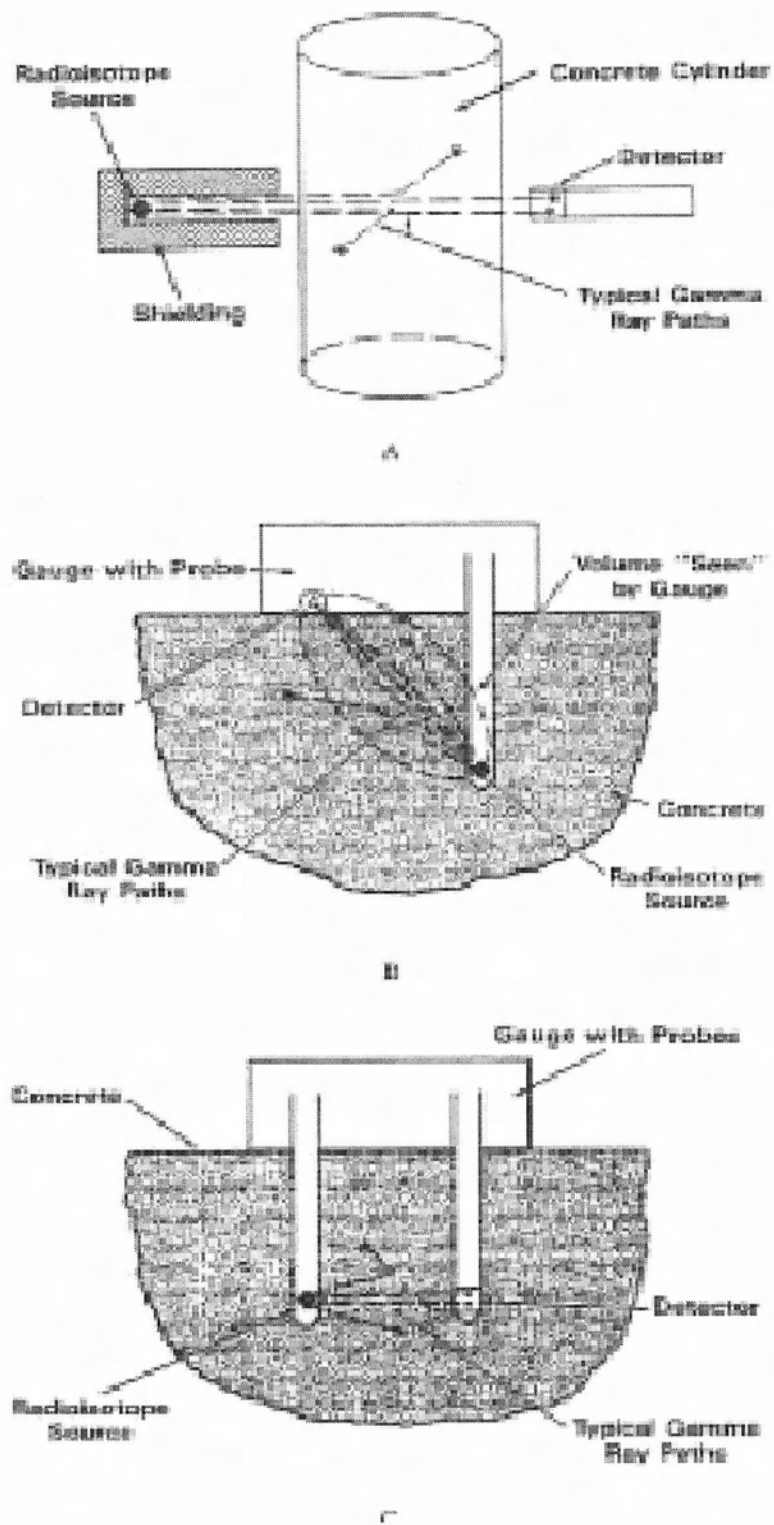
Η αλληλεπίδραση των ακτινών γ με το σκυρόδεμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως διείσδυση με εξασθένιση καθώς αν μια ακτινοβολία εισέλθει σε ένα στοιχείο, τότε ένα μέρος αυτής θα διαπεράσει το στοιχείο, ένα μέρος θα αφαιρεθεί με απορρόφηση και ένα μέρος θα διασκορπιστεί (όταν διασκορπίζονται χάνουν ενέργεια και αλλάζουν κατεύθυνση). Οι ακτίνες που ταξιδεύουν σε στενή δέσμη έχουν ένταση που μειώνεται εκθετικά ανάλογα με τη σχέση:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

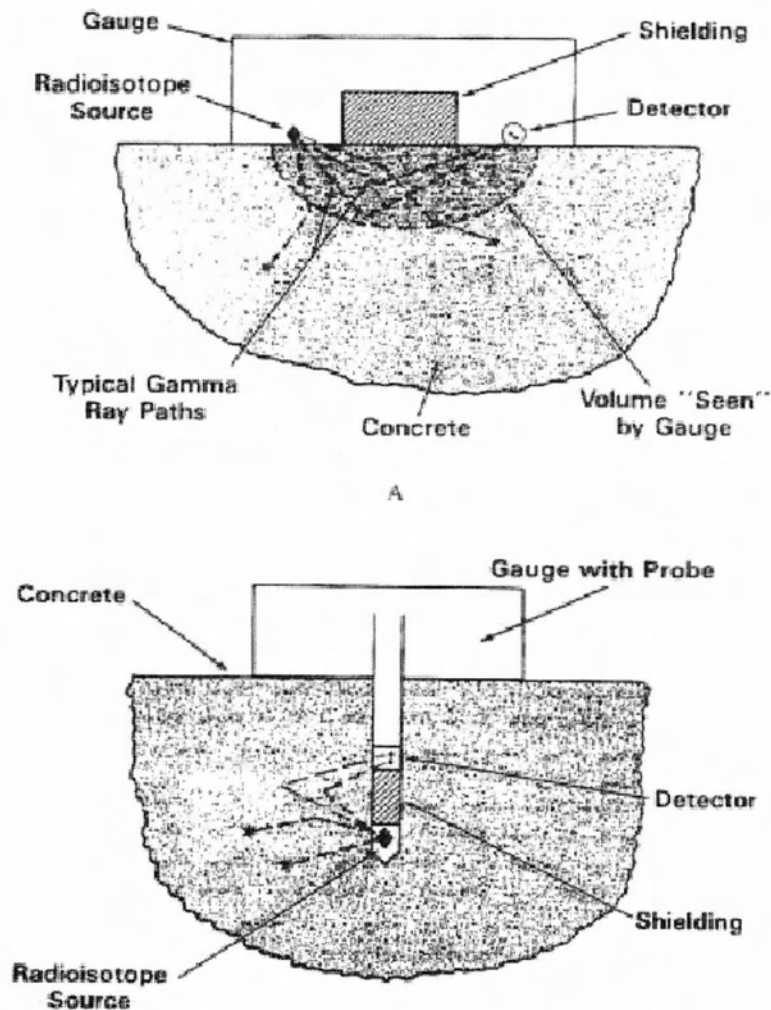
Όπου

- I_0 η ένταση της προσπίπτουσας δέσμης
- μ ένας συντελεστής απορρόφησης
- x η απόσταση τους από την επιφάνεια

Όλα τα συστήματα αποτελούνται από έναν πομπό ακτινοβολιών γ και, έναν ανιχνευτή ακτινοβολίας και φυσικά το σκυρόδεμα το οποίο εξετάζουμε. Στο σχήμα 2.26 ο πομπός και ο ανιχνευτής βρίσκονται έξω από το σκυρόδεμα ενώ στο σχήμα 2.27 η πηγή βρίσκεται στο εσωτερικό και ο ανιχνευτής στο εξωτερικό και αντίστροφα.



Σχήμα 2.26: Πομπός και ανιχνευτής έξω από το σκυρόδεμα.



Σχήμα 2.27: Πηγή στο εσωτερικό και ανιχνευτής στο εξωτερικό και αντίστροφα.

2.9.5. Μέτρηση Ρυθμού Διάβρωσης

Υπάρχουν πολλές τεχνικές που δίνουν τη δυνατότητα του υπολογισμού του ρυθμού της διάβρωσης του χάλυβα στο σκυρόδεμα. Μία βασική αρχή είναι να υπολογίζουμε την ροή ρεύματος σε διαβρωτικό περιβάλλον ράβδων οπλισμού, η οποία δείχνει το πόσο γρήγορα διαβρώνεται μία γνώριμη περιοχή. Ο βαθμός στον οποίο επηρεάζεται η λειτουργία του χάλυβα κατά τη διαδικασία της διάβρωσης υπολογίζεται, με κάποιο

συγκεκριμένο επίπεδο ακρίβειας, μέσω του υπολογισμού του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται κατά την ανοδική αντίδραση και αυτού που καταναλώνεται κατά την καθοδική αντίδραση. Υπάρχει απ ευθείας σχέση που συνδέει τη ροή ρεύματος σε διαβρωτικό περιβάλλον ράβδων οπλισμού με τη μάζα του χάλυβα που χάνεται σύμφωνα με τη νόμο του Faraday. Βέβαια η ροή μπορεί να υπολογιστεί και έμμεσα από τη σχέση :

$$I_{\text{corr}} = B / R_p$$

όπου

I_{corr} η μεταβολή της ροής

B σταθερά που σχετίζεται με τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά του χάλυβα

R_p η αντίσταση πόλωσης

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η γραμμική σχέση έχει αξία μόνο όταν η μεταβολή είναι μικρότερη των 20 mV.

3. ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΟ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ – ΥΠΕΡΗΧΟΙ

3.1. Κρουσίμετρο Αναπήδησης Schmidt

3.1.1. Προέλευση

Το 1948 ο Ernst Schmidt, ένας Σουηδός μηχανικός, διαμόρφωσε μια συσκευή για τον έλεγχο του σκυροδέματος, βασισμένη στον κανόνα της αναπήδησης [23]. Το κίνητρο για αυτή τη νέα συσκευή προήλθε από προηγούμενους ελέγχους μέτρησης της σκληρότητας των μετάλλων. Σε αυτή τη περίπτωση, η νέα συσκευή αποτέλεσε μια εξέλιξη της δοκιμής σκληρομέτρησης με σκληροσκόπιο, η οποία ασχολείται με την μέτρηση της αναπήδησης ενός κρουσίμετρου από διαμάντι ή μιας μάζας, η οποία αναπηδά σε ένα συγκεκριμένο ύψος πάνω από την επιφάνεια δοκιμής.

Το χαμηλό κόστος σε συνδυασμό με την απλότητά της μεθόδου δικαιολογούν τη διασημότητα του κρουσίμετρου αναπήδησης για χρήση στο εργαστήριο αλλά και σε υφιστάμενες κατασκευές. Όπως είπε και ο Kolek [24]: *«η χρησιμότητα της συσκευής βαθμολογείται από πολύ χρήσιμη έως άχρηστη»*. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το 1986 πωλήθηκαν 50000 κρουσίμετρα παγκοσμίως.

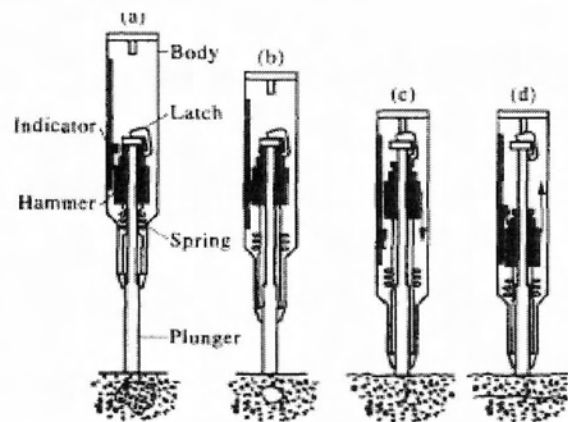


Σχήμα 3.1 : Κρουσίμετρο αναπήδησης.

3.1.2. Περιγραφή Διαδικασίας

Το κρουσίμετρο Schmidt που φαίνεται στο σχήμα 3.1 ζυγίζει περίπου 1,8 kg και αποτελείται από ένα ατσάλινο έμβολο, που εφαρμόζεται σε ελατήριο. Επίσης διαθέτει ένα μηχανισμό που κλειδώνει το έμβολο και μετράει την αναπήδηση του σφυριού. Όταν το κρουσίμετρο πιέζεται κατακόρυφα σε μια επιφάνεια, απελευθερώνεται το έμβολο και το ύψος αναπήδησής του θεωρείται μια ένδειξη της σκληρότητας της

επιφάνειας. Η απόσταση αναπήδησης μετράται σε μια αυθαίρετη κλίμακα από 10 έως 100. Αυτή η απόσταση ονομάζεται συντελεστής αναπήδησης, R , και αντιστοιχεί στη θέση του αναβάτη στη κλίμακα.



Σχήμα 3.2: Διαδικασία μέτρησης.

Αρχικά το κρουσίμετρο εφαρμόζεται κατακόρυφα στην επιφάνεια του σκυροδέματος (Σχήμα 3.2a) και στη συνέχεια πιέζεται προς αυτήν (Σχήμα 3.2b). Η πίεση αυτή στην εξεταζόμενη επιφάνεια συμπιέζει το ελατήριο μέχρις ότου απελευθερωθεί αυτόματα προκαλώντας στη μάζα να κινηθεί προς το έμβολο με την ενέργεια του συμπιεσμένου ελατηρίου (Σχήμα 3.2c). Η μάζα χτυπά την κορυφή της ράβδου του εμβόλου και αναπηδά, διότι η ράβδος πιέζεται δυνατά στην επιφάνεια του σκυροδέματος (Σχήμα 3.2d). Το κρουσίμετρο αυτόματα καταγράφει το βαθμό αναπήδησης της μάζας σαν ποσοστό της αρχικής προέκτασης του ελατηρίου [25].

3.1.3. Λειτουργική Αρχή του Κρουσίμετρου

Το κρουσίμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί οριζόντια, κάθετα ή γενικά σε κάθε ενδιάμεση γωνία, με την προϋπόθεση όμως να είναι κάθετο προς την επιφάνεια υπό δοκιμή. Η θέση της μάζας σε σχέση με την κατακόρυφο, όμως, επηρεάζει το συντελεστή αναπήδησης, λόγω της επενέργειας της βαρύτητας της μάζας στο κρουσίμετρο. Έτσι, ο συντελεστής αναπήδησης σε ένα πάτωμα αναμένεται να είναι μικρότερος από αυτόν ενός δώματος ενώ επιφάνειες με κλίση ή κάθετες θα αποφέρουν τα ενδιάμεσα αποτελέσματα.[26]

Στην οριζόντια κατεύθυνση, η ενέργεια που εκλύεται από το ελατήριο ισούται με την κινητική ενέργεια του εμβόλου όταν αυτό απελευθερώνεται :

$$0.5kx_1^2 = 0.5MV_1^2 \quad (1)$$

όπου k είναι η σταθερά του ελατηρίου, x_1 η μέγιστη έκταση του ελατηρίου όταν είναι οπλισμένο, M η μάζα του εμβόλου και V_1 η ταχύτητά του όταν πραγματοποιείται η μέτρηση. Παρομοίως, η κινητική ενέργεια του εμβόλου στιγμιαία κατά την αναπήδηση πρέπει να ισούται με την ενέργεια που εκλύεται από το ελατήριο όταν αυτό εκτείνεται κατά x_2 στη μέγιστη θέση αναπήδησης :

$$0.5kx_2^2 = 0.5MV_2^2 \quad (2)$$

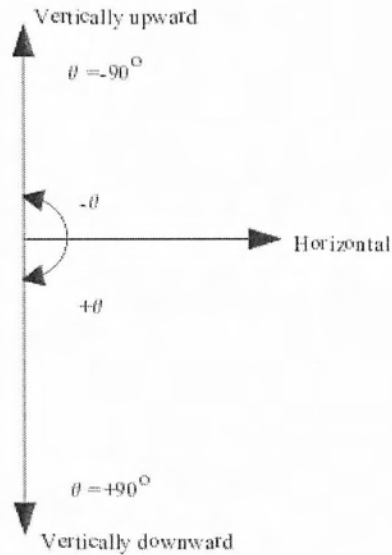
όπου V_2 η αρχική ταχύτητα αναπήδησης του εμβόλου.

Συνδυάζοντας τις (1), (2) προκύπτει :

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{V_2}{V_1} \quad (3)$$

Ο λόγος x_2/x_1 επί τοις εκατό αποτελεί την τιμή αναπήδησης R :

$$R_h = \frac{x_2}{x_1} \times 100. \quad (4)$$



Σχήμα 3.3

Όταν η διεύθυνση της μέτρησης είναι σε γωνία θ με την κατακόρυφη διεύθυνση, η πρώτη ενεργειακή εξίσωση ισορροπίας γίνεται :

$$0.5kx_1^2 + Mgx_1 \cos(90 - \theta) = 0.5MV_{1(\theta)}^2 \quad (5)$$

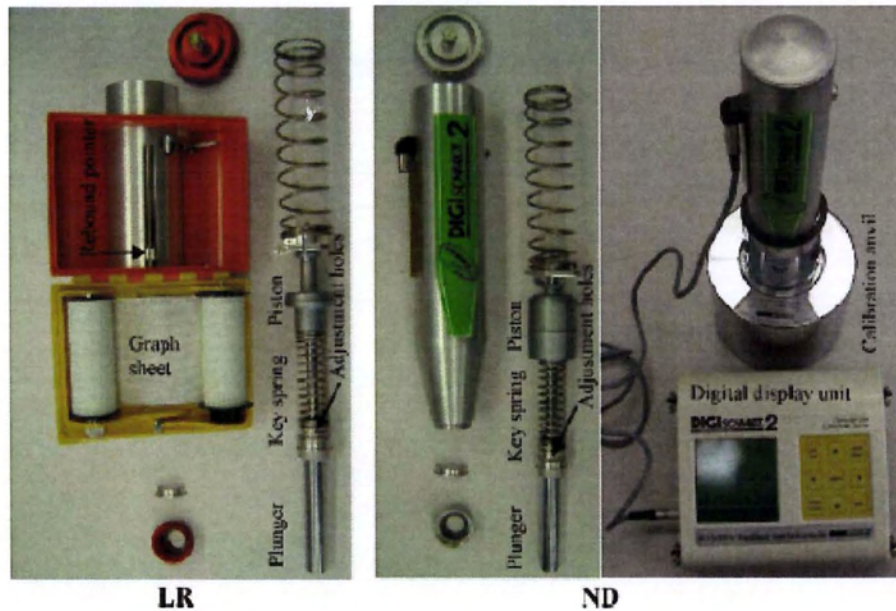
Παρομοίως, στη θέση μέγιστης αναπήδησης, μπορεί να γραφεί ως :

$$0.5MV_{2(\theta)}^2 = 0.5kx_{2(\theta)}^2 + Mgx_{2(\theta)} \cos(90 - \theta). \quad (6)$$

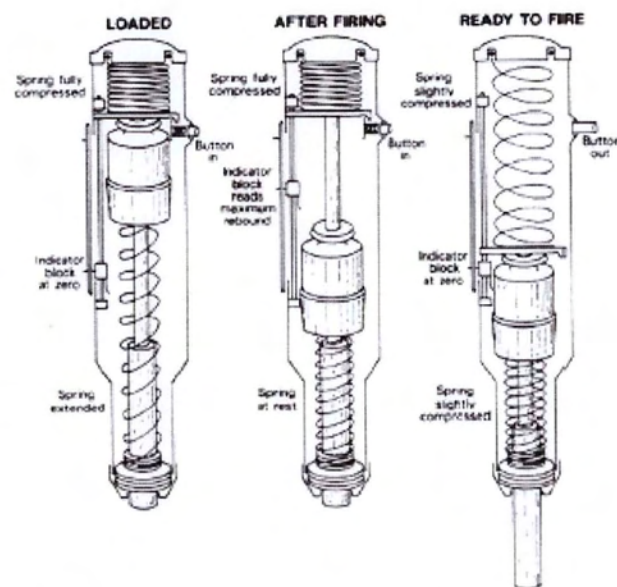
όπου k , x_1 , M και θ είναι γνωστά, ο λόγος $x_2(\theta)/x_1$ μπορεί να μετρηθεί, το $V_{2(\theta)}^2$ μπορεί να υπολογιστεί από την (6). Καθώς αυτή η ταχύτητα παράγεται από την ενέργεια κρούσης (Εξ. (5)), η αντίστοιχη ταχύτητα στην οριζόντια κατεύθυνση (Εξ. (1)) θα είναι :

$$V_2^2 = \frac{V_{2(\theta)}^2 (0.5kx_1^2)}{0.5kx_1^2 + Mgx_1 \cos(90 - \theta)} \quad (7)$$

Βάζοντας $\theta=0^\circ$, επαληθεύεται ο τύπος αναπήδησης στην οριζόντια διεύθυνση της εξίσωσης (4). Για τον τύπο αναπήδησης στην κατακόρυφη διεύθυνση με βάση τις εξισώσεις (5), (6), λύνουμε ως προς το λόγο x_2/x_1 για $\theta=90^\circ$.



Σχήμα 3.4 : Τμήματα που απαρτίζουν το κρουσίμετρο.



Σχήμα 3.5 : Αρχές λειτουργίας του κρουσίμετρο.

3.1.4. Χαρακτηριστικά – Περιορισμοί

3.1.4.1. Συσχέτιση Τιμής Αναπήδησης – Αντοχής

Η χρήση του κρουσίμετρου αναπήδησης Schmidt είναι αρκετά εκτεταμένη. Παρά την παραπλανητική απλότητά του πολλοί ανταποκρινόμενοι στο ερωτηματολόγιο της RILEM [24] προειδοποιούν ότι οι δοκιμές και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνονται από άτομα με εμπειρία στο σκυρόδεμα. Οι κατασκευαστές συνιστούν ότι το κάθε αποτέλεσμα πρέπει να είναι ο μέσος όρος δώδεκα μετρήσεων και επίσης καμία μέτρηση δε πρέπει να απορρίπτεται εκτός αν υπάρχουν προφανείς λόγοι. Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το σκυρόδεμα σε απόσταση 30 mm από την επιφάνεια και γι' αυτό είναι ευαίσθητα σε αλλαγές επιφανειακής σκληρότητας, ιδιαίτερα σε παλιότερα σκυροδέματα, των οποίων η επιφάνεια έχει μικρή σχέση με τη θλιπτική αντοχή. Ωστόσο, εάν χρησιμοποιηθεί σε υφιστάμενη κατασκευή είναι απαραίτητος ο άμεσος συσχετισμός μεταξύ των τιμών αναπήδησης και της αντοχής των πυρήνων που λαμβάνονται από τη δομή.

Το κρουσίμετρο μελετήθηκε εκτεταμένα στο Swiss Federal Materials Testing and Experimental Institute στη Ζυρίχη. Έτσι, διαμορφώθηκε μια συσχέτιση ανάμεσα στη θλιπτική αντοχή συγκεκριμένων δοκιμίων και στη τιμή αναπήδησης, και αυτή η συσχέτιση παρεχόταν μαζί με το όργανο. Ωστόσο, καθώς και άλλοι ερευνητές ξεκίνησαν να διατυπώνουν σχέσεις μεταξύ θλιπτικής αντοχής και συντελεστή αναπήδησης, αποδείχθηκε ότι δεν υπάρχει ενιαία σχέση μεταξύ αντοχής και συντελεστή αναπήδησης [25]. Χωρίς τον κατάλληλο συσχετισμό λοιπόν κάθε φορά, το κρουσίμετρο αναπήδησης είναι χρήσιμο μόνο για εντοπισμό ακαθάριστων αλλαγών στη ποιότητα του σκυροδέματος μιας κατασκευής.

3.1.4.2. Επιφανειακοί Παράγοντες Επιρροής

Το κρουσίμετρο εξετάζει μόνο μια σχετικά μικρή περιοχή σκυροδέματος γύρω από το σημείο κρούσης. Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε τοπικές μεταβολές στο σκυρόδεμα όπως παρουσία μεγάλων σκληρών αδρανών ή κάποιων κενών. Επίσης, εάν χρησιμοποιείται σε δοκίμια στο εργαστήριο ή γενικά σε φορείς οι οποίοι δεν αποτελούν μέρος μιας μεγάλης μάζας, οποιαδήποτε μετακίνηση των

φορέων υπό δοκιμή που προέρχεται από το κρουσίμετρο οδηγεί σε μείωση του συντελεστή αναπήδησης. Η απλότητα και η ταχύτητα ωστόσο της μεθόδου επιτρέπει μεγάλο αριθμό μετρήσεων αποκλείοντας όσες απέχουν πολύ από τη μέση τιμή.

Το κρουσίμετρο αναπήδησης επειδή μετρά τη σκληρότητα της επιφάνειας μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα στη περίπτωση φθαρμένου σκυροδέματος. Ο χρήστης λοιπόν πρέπει να λάβει υπόψιν του αυτούς τους περιορισμούς της μεθόδου και παραμέτρους όπως η δομή της επιφάνειας, ενανθράκωση και συνθήκες υγρασίας.

Ο συντελεστής αναπήδησης αφορά τις ιδιότητες του σκυροδέματος για τις στρώσεις κοντά στην επιφάνεια. Σε αυτή τη περιοχή η σκληρότητα του σκυροδέματος είναι γενικά υψηλότερη στο εσωτερικό του στοιχείου εξαιτίας της ενανθράκωσης. Η ενανθράκωση της επιφάνειας σε παλιότερα σκυροδέματα μπορεί να φτάσει σε βάθος 20 mm από την επιφάνεια και μπορεί να προκαλέσει αύξηση μέχρι και 50% στις τιμές της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με την πραγματική αντοχή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το κρουσίμετρο αναπήδησης να μας δίνει υψηλότερη αντοχή για το σκυρόδεμα από την πραγματική του. Επομένως, η αντοχή του σκυροδέματος υπερεκτιμάται μετά τις 28 μέρες εάν χρησιμοποιηθεί η ίδια σχέση μεταξύ συντελεστή αναπήδησης και θλιπτικής αντοχής που προέκυψε χωρίς την επιρροή της ενανθράκωσης[8].

Εξαιτίας αυτής της ευαισθησίας σε επιφανειακούς παράγοντες, πρέπει να εφαρμόζονται καμπύλες βαθμονόμησης για διαφορετικές συνθήκες. Μια βρεγμένη επιφάνεια, για παράδειγμα, μπορεί να δώσει αποτελέσματα 20% μικρότερα από ότι αναμενόταν ενώ καλουπωμένες επιφάνειες διαφορετικού πορώδους μπορούν να δώσουν μεγάλες αποκλίσεις στην επιφανειακή σκληρότητα που δεν έχουν καμία σχέση με την αντοχή του κύριου ιστού του σκυροδέματος. Ένας μειωτικός συντελεστής, (α), χρησιμοποιείται για να λάβουμε υπόψη την επιφανειακή ενανθράκωση. Αυτός ο συντελεστής έχει μια τιμή για ηλικία σκυροδέματος 28 ημερών η οποία μειώνεται όσο αυξάνεται η ηλικία του σκυροδέματος. Έτσι, η εκτιμώμενη αντοχή μειώνεται όταν η δοκιμή πραγματοποιείται μετά τις 28 μέρες [27].

Ο Πίνακας 3.1 περιλαμβάνει τους μειωτικούς συντελεστές που προτείνονται από τον Tanigawa et al. και το Architectural Institute of Japan (AIJ). Παρόλο που οι 2 μειωτικοί συντελεστές έχουν τον ίδιο σκοπό, οι τιμές τους είναι αρκετά διαφορετικές.

Επιπλέον, πρόσφατα παρατηρήθηκε ότι καμία εξίσωση δε δίνει εύστοχα αποτελέσματα, ειδικά όταν η αντοχή του σκυροδέματος είναι υψηλή(πάνω από 50 MPa στις 28 μέρες), και η εξίσωση του Tanigawa et al. έχει εφαρμογή για μέτριας αντοχής σκυροδέματα (25 MPa στις 28 ημέρες). Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επιρροή της ενανθράκωσης στη σχέση μεταξύ του συντελεστή αναπήδησης και τη θλιπτικής αντοχής διαφέρει ανάλογα με την αντοχή του σκυροδέματος [28].

Πίνακας 3.1

Tanigawa et al.	At the age of less than 4 weeks:	$\alpha = 1.0$							
	At the age between 4 weeks and 26 weeks:	$\alpha = 0.9-1.0$ (linearly varying with age)							
	At the age of over 26 weeks:	$\alpha = 0.9$							
Architectural Institute of Japan (AIJ)	Age (days)	28	50	70	100	200	500	1000	3000
	α	1.00	0.87	0.84	0.78	0.72	0.67	0.65	0.63

Η συσκευή, λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια απλή και φθηνή πρώτη αποτίμηση επί τόπου της αντοχής του σκυροδέματος. Σε σημεία που η επιφάνεια του σκυροδέματος έχει ενανθρακωθεί ή η στρώση κάτω από την επιφάνεια έχει μαλακώσει, πιο αξιόπιστα αποτελέσματα θα παρθούν αν τρίψουμε την επιφάνεια ώστε να φύγει η επηρεασμένη στρώση και μετά να πραγματοποιήσουμε τη δοκιμή. Τέλος, ο Kolek επιχείρησε να καθορίσει έναν συσχετισμό ανάμεσα στο συντελεστή αναπήδησης R και τη σκληρότητα του σκυροδέματος, όπως αυτή μετρήθηκε από τη μέθοδο Brinell [8].

3.1.4.3. Μειωτικός Συντελεστής λόγω Ενανθράκωσης

Οι σχέσεις ανάμεσα στη τιμή αναπήδησης και στη αντοχή, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος από το συντελεστή αναπήδησης, γενικά προκύπτουν από δοκίμια των 28 ημερών. Συνεπώς, η εκτιμώμενη αντοχή διαφέρει αισθητά από την πραγματική αντοχή αν το υπό εξέταση στοιχείο δεν είναι 28 ημερών. Όπως αναφέρθηκε και πριν, το κύριο θέμα που μας ενδιαφέρει ο παράγοντας ηλικία, είναι η ενανθράκωση της επιφάνειας. Εάν οι

σχέσεις ανάμεσα στη τιμή αναπήδησης και την αντοχή προκύπτουν τη μέρα της δοκιμής, το σφάλμα μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας τη σχέση αναπήδησης – αντοχής που προέκυψε για αυτή την ηλικία του σκυροδέματος. Ωστόσο, εξαιτίας της μη πρακτικότητας της μεθόδου, χρησιμοποιείται εναλλακτικά ο συντελεστής μείωσης της αντοχής. Αυτές οι μέθοδοι περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- Πρώτη μέθοδος (ιδανική περίπτωση)
 1. Παίρνουμε την τιμή αναπήδησης σε χρόνο t , $R(t)$.
 2. Σχηματίζουμε μια άμεση σχέση ανάμεσα σε $R(t)$ και $f_c(t)$ για να εκτιμήσουμε την αντοχή σε χρόνο t . Σε αυτή τη περίπτωση, δε χρειάζεται να λάβουμε υπόψη την επιρροή της ενανθράκωσης.
- Δεύτερη Μέθοδος (πρακτική περίπτωση)
 1. Παίρνουμε την τιμή αναπήδησης σε χρόνο t , $R(t)$.
 2. Αλλάζουμε το $R(t)$ με το $R(28)$ στη σχέση ανάμεσα στο $R(28)$ και $f_c(28)$ για να πάρουμε την προ-εκτιμημένη αντοχή σε χρόνο t , $f_{c28}(t)$. Αυτή η τιμή επηρεάζεται άμεσα από την ενανθράκωση.
 3. Πολλαπλασιάζουμε την $f_c(28)$ με τον $\alpha(t)$, το μειωτικό συντελεστή αντοχής σε χρόνο t , για να πάρουμε την εκτιμώμενη αντοχή σε χρόνο t , $f_c(t) = \alpha(t) * f_{c28}(t)$. Έτσι λαμβάνουμε υπόψη μας την ενανθράκωση [29].

3.1.4.4. Επιρροή Τσιμέντου – Τύπου Αδρανών

Πολλοί άλλοι παράγοντες εκτός από την επιφάνεια και την ηλικία μπορούν να επηρεάσουν τις μετρήσεις. Τσιμέντα με υψηλή περιεκτικότητα σε οξείδια αλουμινίου μπορούν να δώσουν μέχρι και 100% μεγαλύτερες αντοχές από τα κλασσικά τσιμέντα Portland. Αντιθέτως, υπέρ θειώδη τσιμέντα μπορούν να δώσουν μέχρι και 50% χαμηλότερες τιμές από τα κλασσικά τσιμέντα Portland. Διαφορές στη συγκεκριμένη επιφάνεια για άλλα παρόμοια τσιμέντα προκαλούν ελάχιστες αποκλίσεις της τάξης του 10% στις τιμές θλιπτικής αντοχής.

Εκτός από περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται ασυνήθιστοι τύποι αδρανών, διαφορετικοί τύποι αδρανών προκαλούν μικρές αποκλίσεις ενώ μεταβολές στο λόγο αδρανών προς τσιμέντου δίνουν μέχρι 10% απόκλιση.

3.1.4.5. Εκτίμηση Ποιότητας Δαπέδου

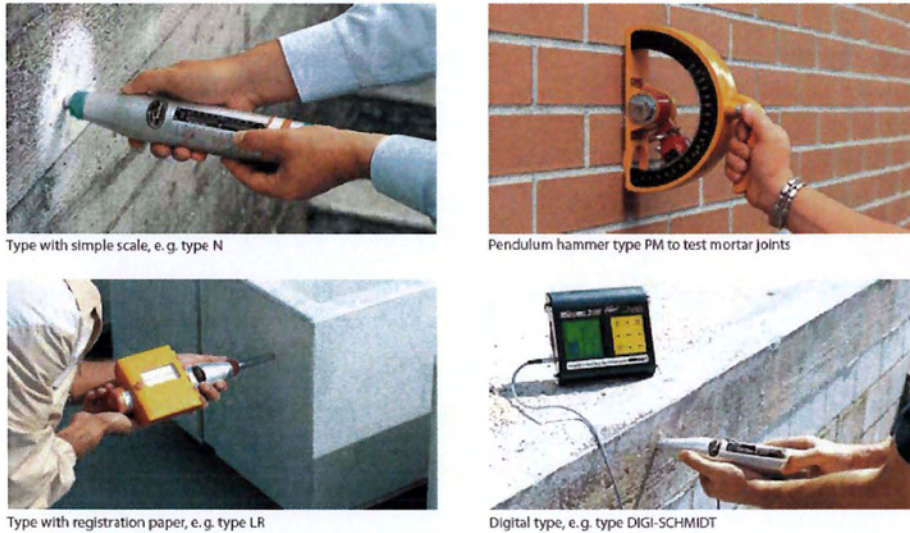
Ένα άλλο παράδειγμα χρήσης του κρουσίμετρου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επανεκτίμηση της ποιότητας του δαπέδου. Συχνά χαρακτηρίζεται ως μειονέκτημα του κρουσίμετρου ότι επηρεάζεται σημαντικά από τις επιφανειακές στρώσεις του υπό εξέταση στοιχείου. Στο δάπεδο η τριβή αντίστασης της επιφάνειας είναι το πιο σημαντικό στοιχείο της ποιότητάς του. Στον Πίνακα 3.2., χρησιμοποιώντας μια συσκευή χρόνιας φθοράς επιφάνειας για συσχέτιση δημιουργήθηκε μία αντιστοιχία του συντελεστή αναπήδησης με τη φέρουσα ικανότητα χρήσης του δαπέδου :

Πίνακας 3.2 [30]

Suggested values of mean rebound index for differing grades of concrete in floors finished by trowelling and with a good standard of curing			
Class	Abrasion resistance	Mean 28-day rebound Index	Compressive strength of concrete (N/mm ²)
1	High	45-50	60+
2	Good	40-45	40-50
3	Nominal	35-40	30-40
4	Negligible	Less than 35	20

3.1.5. Είδη Κρουσιμέτρων

Σήμερα, υπάρχουν διάφορα είδη κρουσιμέτρων Schmidt όπως φαίνονται και στη παρακάτω εικόνα :



Σχήμα 3.6: Διάφορα είδη κρουσιμέτρων

Τύπου N:

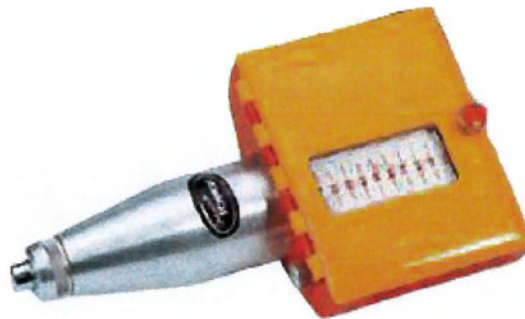
- Έχει εύρος τιμών θλιπτικής αντοχής από 10 έως 70 MPa (κάτω από 25 MPa το κρουσίμετρο τύπου P είναι προτιμότερο).
- Ενέργεια κρούσης = 2,207 Nm
- Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της θλιπτικής αντοχής προκατασκευασμένων δοκών οπλισμένου σκυροδέματος. Οι τιμές αναπήδησης καταγράφονται από ένα βοηθό ο οποίος στη συνέχεια υπολογίζει τη μέση τιμή τους και βρίσκει με βάση θλιπτική αντοχή από ένα συγκεκριμένο διάγραμμα $f_{ck} - R$.



Σχήμα 3.7: Κρουσίμετρο τύπου N.

Τύπου NR:

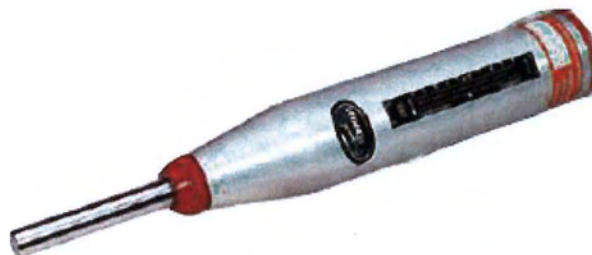
- Έχει εύρος τιμών θλιπτικής αντοχής από 10 έως 70 MPa
- Ενέργεια κρούσης = 2,207 Nm
- Οι τιμές αναπήδησης καταγράφονται σαν ένα ιστόγραμμα σε μια λωρίδα χαρτί. Ένα ρολό χαρτί έχει χώρο για 4000 δοκιμές.
- Μια γέφυρα που σκυροδετείται σε πολλά στάδια ελέγχεται για την ομοιογένεια του σκυροδέματος. Ο μηχανικός πραγματοποιεί μια σειρά από δοκιμές ανά 10 m απόσταση.



Σχήμα 3.7: Κρουσίμετρο τύπου NR.

Τύπου L/LR

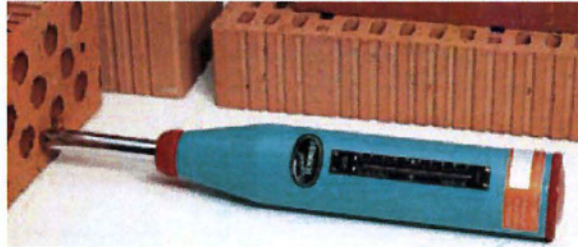
- Έχει εύρος τιμών θλιπτικής αντοχής από 10 έως 70 MPa
- Παρόλο που έχει τις ίδιες διαστάσεις με τα δύο προηγούμενες συσκευές έχει 3 φορές μικρότερη ενέργεια κρούσης (0.735 Nm).
- Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο λεπτών τοίχων (<100 mm) ή μικρών στοιχείων ευαίσθητων σε κρούση.



Σχήμα 3.8: Κρουσίμετρο τύπου LR.

Τύπου LB

- Ίδιες διαστάσεις και ενέργεια κρούσης με το τύπου L.
- Η άκρη του εμβόλου είναι ειδικά σχεδιασμένη.
- Χρησιμοποιείται για τούβλα και γενικά για προϊόντα καμένου πηλού.



Σχήμα 3.9: Κρουσίμετρο τύπου LB.

Τύπου Digi – Schmidt

- Έχει εύρος τιμών θλιπτικής αντοχής από 10 (ND) , 18 (LD) έως 70 MPa
- Μπορεί να δώσει απευθείας τη θλιπτική αντοχή από την τιμή αναπήδησης μέσω καμπυλών που διαθέτει από τον κατασκευαστή του ή που υπολογίζονται από τον μηχανικό.
- Διαθέτει διορθωτικούς συντελεστές ανάλογα με τις συνθήκες των μετρήσεων για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Διαθέτει διάφορες μεθόδους υπολογισμού του τελικού R, απορρίπτοντας αποκλίνουσες μετρήσεις.
- Τα αποτελέσματα μπορούν να αποθηκευτούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Παρόμοια συσκευή χρησιμοποιήθηκε και στο Εργαστήριο «Τεχνολογίας και Κατασκευών Ωπλισμένου Σκυροδέματος». Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Digi-Schmidt από την εταιρία Proceq. Αναλυτικά οι μετρήσεις παρουσιάζονται στο 4^ο κεφάλαιο.



Σχήμα 3.10: Κρουσίμετρο τύπου Digi-Schmidt.

Τύπου PM

- Αυτό το κρουσίμετρο τύπου εκκρεμούς χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ποιότητας κονιάματος στη τοιχοποιία ή για τον έλεγχο γύψινων ορόφων.
- Η ποιότητα του κονιάματος παρέχεται μέσω συνεχόμενων δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο TNO, Τεχνολογικό Ινστιτούτο στο Delft.



Σχήμα 3.11: Κρουσίμετρο τύπου PM.

Το κρουσίμετρο αναπήδησης Schmidt είναι χρήσιμο για τον έλεγχο της ομοιογένειας του σκυροδέματος και της σύγκρισής του με άλλα, όμως αποτελεί μια πρόχειρη ένδειξη της θλιπτικής αντοχής του. Είναι γενικά αποδεκτό ότι οι χρήστες πρέπει να προετοιμάζουν τα δικά τους διαγράμματα βαθμονόμησης καλύπτοντας όλο το εύρος των μεταβλητών που θέλουν να αντιμετωπίσουν.

3.2. Υπέρηχοι

3.2.1. Ορισμός

Οι μηχανικές δονήσεις διαδίδονται μέσα από στερεά, υγρά και αέρια καθώς η δόνηση μεταφέρεται από το ένα σωματίδιο της ύλης στο διπλανό του. Όταν τα σωματίδια της ύλης βρίσκονται υπό ταλάντωση και η κίνησή τους είναι περιοδική τότε μετριέται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο ($\text{Hz} = \text{sec}^{-1}$). Όταν μάλιστα η συχνότητα της δόνησης είναι μεταξύ 10 και 20000 Hz, ο ήχος ακούγεται από το ανθρώπινο αυτί. Για δονήσεις με συχνότητα πάνω από 20000 Hz οι «ήχοι» δεν ακούγονται και ονομάζονται υπέρηχοι (ultrasound ή ultrasonic).

Τα ηχητικά κύματα δεν είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά είναι κύματα κίνησης παρόμοια με τα θαλάσσια κύματα. Όταν τα κύματα των ήχων και υπερήχων διαδίδονται μέσα στα υλικά, υφίστανται απόσβεση και ανακλώνται, διαθλώνται ή σκεδάζονται όταν συναντούν εμπόδια ή ασυνέχειες, ανάλογα με τη συχνότητά τους. Την ιδιότητα αυτή τη χρησιμοποιούμε για να εντοπίσουμε τυχόν ατέλειες στο εσωτερικό ενός σώματος χωρίς να το τεμαχίσουμε (ΜΚΕ).

Η ταχύτητα του διαμήκους κύματος δίνεται από :

$$V = L/T \quad (\text{km/s ή m/s})$$

Όπου:

V = ταχύτητα του διαμήκους κύματος

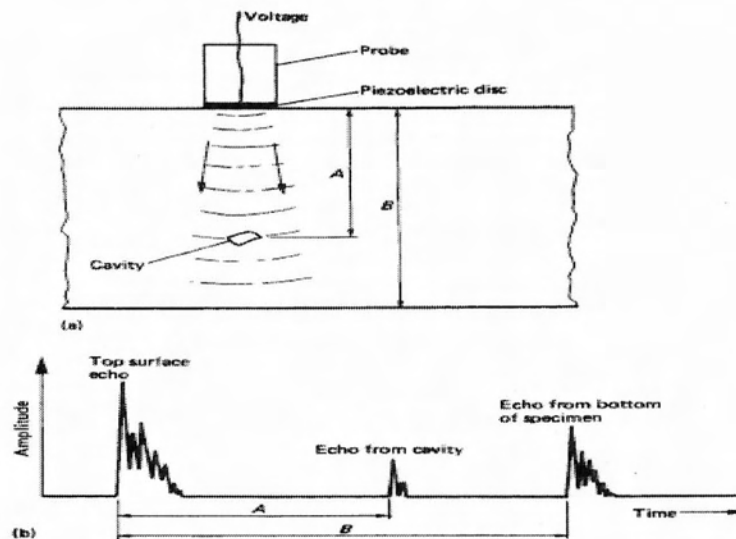
L = η απόσταση του μονοπατιού που διανύει το κύμα

T = ο χρόνος που χρειάζεται το κύμα να διανύσει αυτή την απόσταση.

3.2.2. Διαδικασία Μέτρησης

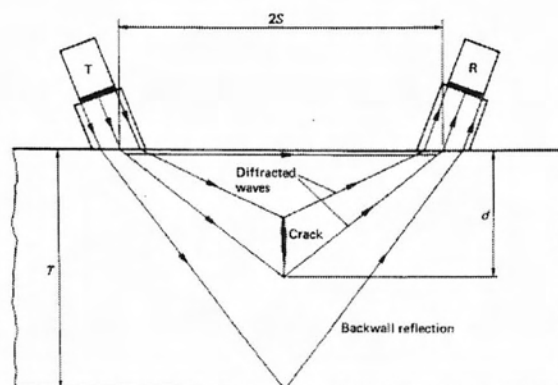
Η λειτουργία της μεθόδου βασίζεται στην εκπομπή ενός παλμού υπερήχων μέσα στο υλικό και την καταγραφή των ανακλάσεων που επιστρέφουν. Ο παλμός υπερήχων δημιουργείται με την εφαρμογή ενός παλμού υψηλής τάσης σε ένα πιεζοηλεκτρικό δίσκο. Οι ανακλάσεις δονούν τον ίδιο ή άλλο πιεζοηλεκτρικό δίσκο ο οποίος τις μετατρέπει πάλι σε τάσεις. Κάθε επιφάνεια ανακλά μια ηχώ του παλμού,

με πρώτη απ' όλες την επιφάνεια στην οποία εφάπτεται ο δίσκος και τελευταία την απέναντι επιφάνεια του υλικού. Ανάμεσα στις δύο ανακλάσεις θα βρίσκεται η ηχώ από οποιαδήποτε ατέλεια που υπάρχει μέσα στο υλικό και με εύρος που εξαρτάται από το μέγεθος κάθε ατέλειας.



Σχήμα 3.12. : Βασική αρχή λειτουργίας ελέγχου με υπέρηχους.

Μια παραλλαγή της κλασικής μεθόδου που μετρά το χρόνο ανάκλασης είναι η μέτρηση του χρόνου διάθλασης του παλμού υπερήχων. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τα κύματα που διαθλούνται στα χείλη των ρωγμών και βάσει της γεωμετρίας του δοκιμίου και των θέσεων του πομπού και του δέκτη υπολογίζει το βάθος και μήκος των ατελειών.



Σχήμα 3.13. : Μέτρηση βάθους ρωγμής με ανάκλαση υπερήχων.

3.2.3. Χαρακτηριστικά

Η κλασική μέθοδος εφαρμόστηκε πρώτη φορά από τον Sokolon το 1929 για την ανίχνευση ατελειών, ενώ το 1942 εφαρμόστηκε από τον Firestone για τον έλεγχο των υλικών. Σήμερα είναι γενικά αποδεκτή ως ένα ιδιαίτερα πρακτικό εργαλείο ελέγχου του σκυροδέματος. Ο υπέρηχος ασχολείται κυρίως με το καθορισμό της ταχύτητας του διαμήκους κύματος στο σκυρόδεμα ενώ έχει μικρή ευαισθησία σε κατανεμημένη βλάβη στο σκυρόδεμα. Μπορεί δηλαδή να εντοπίσει μόνο μεγάλες ρωγμές. Η διαδικασία εντοπισμού ρηγμάτων σε μικροσκοπικό επίπεδο βασίζεται στη χρήση μη γραμμικών υπερηχητικών κυμάτων. Σε αντίθεση με τα γραμμικά υπερηχητικά κύματα που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της απόσβεσης ή της ταχύτητας του κύματος, τα μη γραμμικά βασίζονται στο κανόνα ότι τα υπερηχητικά κύματα παράγουν υψηλότερα αρμονικά όταν διαδίδονται σε ρηγματωμένο υλικό. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η σχέση τάσης παραμόρφωσης γίνεται περισσότερο μη γραμμική με υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας εξαιτίας των ελαττωμάτων του υλικού. Για να εντοπίζονται αυτές οι ατέλειες στο σκυρόδεμα, ειδικά οι μικρό-ρωγμές, η παραγωγή τέτοιων υψηλών αρμονικών είναι πολύ σημαντική. Ωστόσο, όταν παράγονται υψηλότερα αρμονικά και υπάρχουν ρωγμές ή φθορές μπορεί να προκληθεί μείωση [32].

Ο εξοπλισμός αποτελείται ουσιαστικά από μια ηλεκτρική γεννήτρια παλμών, ένα ζευγάρι πομπών, έναν ενισχυτή και μια ηλεκτρονική συσκευή μέτρησης χρόνου για τη μέτρηση του χρονικού διαστήματος που χρειάζεται ο παλμός για να φύγει από τον ένα πομπό, να διασχίσει το υλικό και να φτάσει στον άλλο πομπό. Υπάρχουν 2 είδη ηλεκτρονικών συσκευών. Η μία διαθέτει ένα καθοδικό σωλήνα στον οποίο ο παλμός που λαμβάνεται εμφανίζεται σε σχέση με μια κατάλληλη κλίμακα χρόνου ενώ ο άλλος διαθέτει έναν χρονοδιακόπτη που επιτρέπει την απευθείας ανάγνωση της ταχύτητας από τη ψηφιακή οθόνη.

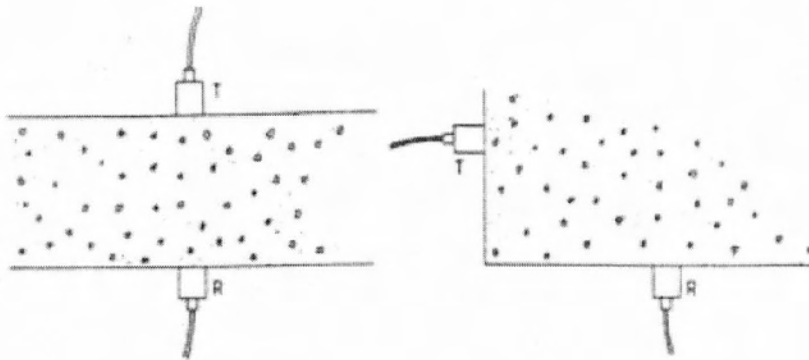
Ο εξοπλισμός θα πρέπει να είναι σε θέση να μετρά το χρόνο διέλευσης κατά μήκος μονοπατιών που κυμαίνονται από 100 mm έως το μέγιστο πάχος και να υπάρχει ακρίβεια της τάξης του 1%. Γενικά οι πομποί που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να είναι στο φάσμα των 20 με 150 kHz αν και συχνότητες χαμηλές της τάξεως των 10 kHz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολύ μεγάλες διαδρομές μέσα στο σκυρόδεμα ενώ υψηλές συχνότητες της τάξεως του 1 MHz για κονιάματα και γενικά μικρές

διαδρομές. Οι παλμοί υψηλής συχνότητας έχουν γενικά πιο καθορισμένη μορφή αλλά, καθώς περνούν μέσα από το σκυρόδεμα εξασθενούν πιο εύκολα σε σχέση με αυτούς που έχουν χαμηλή συχνότητα. Συνεπώς είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται υψηλής συχνότητας παλμοί για μικρές αποστάσεις στο σκυρόδεμα και χαμηλής για μεγάλα. Πομποί με συχνότητες 50 – 60 kHz είναι κατάλληλοι για τις κλασικές περιπτώσεις [33].

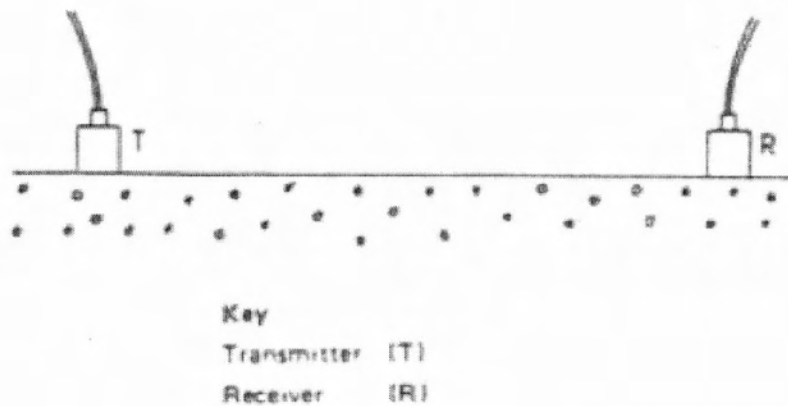
3.2.4. Τρόποι διάδοσης κύματος

Ο δέκτης πομπός λαμβάνει τον παλμό που φτάνει νωρίτερα. Αυτή είναι γενικά η αρχή της διαμήκουσ δόνησης. Παρόλο που η κατεύθυνση προς την οποία διαδίδεται η μέγιστη ενέργεια είναι σε ορθή γωνία με την όψη του πομπού που μεταδίδει τους παλμούς, είναι δυνατόν αυτοί να ανιχνεύονται, ακόμα και αν ταξιδεύουν μέσα στο σκυρόδεμα σε κάποια άλλη κατεύθυνση. Είναι δυνατόν λοιπόν να μετράμε την παλμική ταχύτητα τοποθετώντας τους πομπούς είτε σε :

- απέναντι επιφάνειες (άμεση διάδοση)
- παρακείμενες επιφάνειες (ημι-άμεση διάδοση)
- στην ίδια επιφάνεια (έμμεση ή επιφανειακή διάδοση)



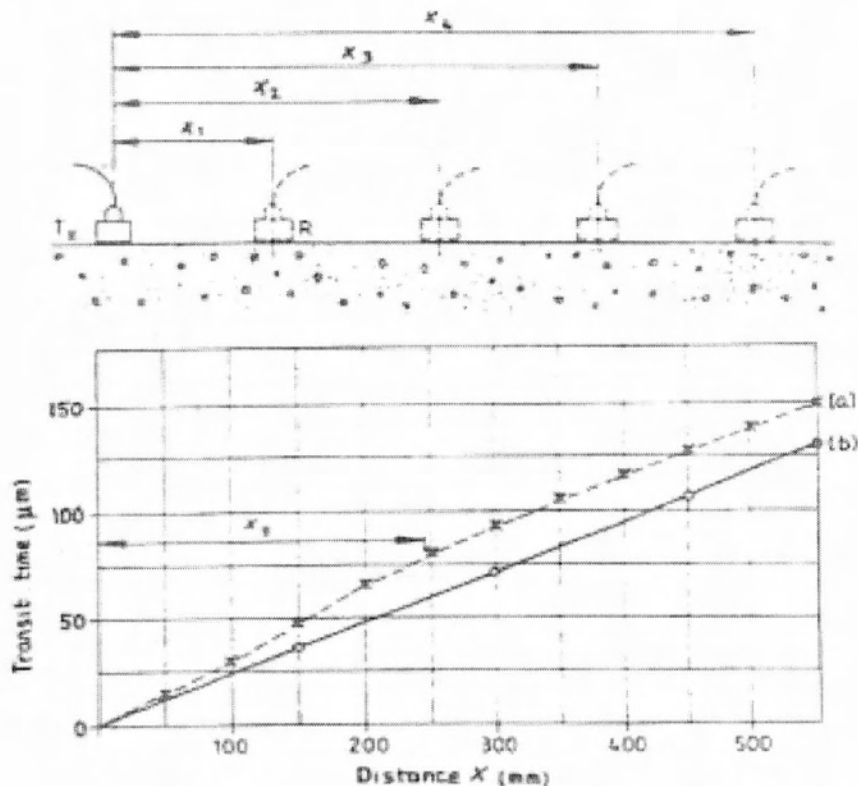
Σχήμα 3.14: Άμεση διάδοση / ημι-άμεση διάδοση.



Σχήμα 3.15: Έμμεση ή επιφανειακή διάδοση.

Όπου είναι δυνατόν θα πρέπει να χρησιμοποιείται η άμεση διάδοση, εφόσον η μεταβίβαση ενέργειας μεταξύ των πομπών είναι μέγιστη και η ακρίβεια του καθορισμού της ταχύτητας συνεπώς, διέπεται κυρίως από την ακρίβεια μέτρησης του μήκους διαδρομής. Η αλοιφή που χρησιμοποιείται θα πρέπει να απλώνεται όσο το δυνατόν καλύτερα για να αποφευχθεί κάποιο ανεπιθύμητο αποτέλεσμα εξαιτίας των διαφορετικών ταχυτήτων σε αλοιφή και σκυροδέμα. Η ημι-άμεση διάδοση έχει μια ενδιάμεση ευαισθησία σε σχέση με τις άλλες δύο διαδόσεις και, παρόλο που μπορεί να υπάρξει κάποια μείωση στην ακρίβεια της μέτρησης του μήκους διαδρομής, θεωρείται γενικά ικανοποιητικά εύστοχο να θεωρηθεί αυτή ως η απόσταση από κέντρο σε κέντρο της επιφάνειας των πομπών. Η διάδοση αυτή λοιπόν, είναι αρκετά παρόμοια με την άμεση. Η έμμεση διάδοση χρησιμοποιείται όταν υπάρχει πρόσβαση σε μόνο μια επιφάνεια του σκυροδέματος, όταν θέλουμε να καθορίσουμε το βάθος της επιφανειακής ρωγμής ή, όταν ενδιαφερόμαστε να συσχετίσουμε την επιφανειακή ποιότητα του σκυροδέματος με την γενική. Είναι η λιγότερο ευαίσθητη διάδοση και, για ένα συγκεκριμένο μονοπάτι, παράγει στον παραλήπτη πομπό ένα σήμα το οποίο έχει μόνο 2%-3% το εύρος της άμεσης διάδοσης. Επιπλέον, η παρούσα διάδοση δίνει μετρήσεις ταχύτητας που συνήθως επηρεάζονται από τις επιφανειακές στρώσεις σκυροδέματος. Αυτή η περιοχή έχει συχνά διαφορετική σύσταση από εκείνη του σκυροδέματος στο εσωτερικό, οπότε τα αποτελέσματα μπορεί να είναι μη αντιπροσωπευτικά. Η έμμεση ταχύτητα είναι πάντοτε χαμηλότερη από την άμεση για το ίδιο στοιχείο. Αυτή η διαφορά μπορεί να κυμαίνεται από 5% έως 20%, σε μεγάλο

βαθμό ανάλογα με τη ποιότητα του σκυροδέματος υπό δοκιμή. Όπου είναι εφικτό μετρήσεις χώρου θα πρέπει να γίνουν για να καθορίσουν τη διαφορά αυτή. Με έμμεση διάδοση υπάρχει κάποια αβεβαιότητα όσον αφορά την ακριβή διάρκεια της διάδοσης λόγω του σημαντικού μεγέθους των περιοχών επαφής ανάμεσα στους πομπούς και το σκυρόδεμα. Συνεπώς, είναι προτιμότερο να γίνουν μια σειρά από μετρήσεις με τους πομπούς σε διαφορετικές αποστάσεις για να εξαλειφθεί αυτή η αβεβαιότητα. Για να γίνει αυτό θα πρέπει ο αποστέλλων πομπός να τοποθετηθεί σε επαφή με το σκυρόδεμα σε ένα σταθερό σημείο x , και ο δέκτης να τοποθετείται σε διάφορα σημεία x_n πάνω σε μια συγκεκριμένη ευθεία στην επιφάνεια. Οι χρόνοι εκπομπής θα πρέπει να καταγράφονται γραφικά σε σχέση με την απόσταση των πομπών. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 3.16. Η κλίση της βέλτιστης ευθείας που χαράσσεται με βάση τα σημεία μέτρησης, μετράται και καταγράφεται ως μέση παλμική ταχύτητα κατά μήκος της γραμμής στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Εάν υπάρχει μια ασυνέχεια σε αυτές τις μετρήσεις, είναι πιθανόν ότι υπάρχει μια επιφανειακή ρωγμή ή μια στρώση κατώτερης ποιότητας. Σε αυτή τη περίπτωση η μέτρηση θεωρείται αναξιόπιστη [34].



Σχήμα 3.16

3.2.5. Εξασφάλιση Βέλτιστης Μέτρησης

Για να εξασφαλιστεί ότι ο υπέρηχος διαπερνάει το σκυροδέμα, είναι σημαντικό να υπάρχει μια επαρκής ακουστική σύζευξη μεταξύ του σκυροδέματος και της επιφάνειας του κάθε πομπού. Για πολλές επιφάνειες το φινίρισμα είναι επαρκώς λείο για να εξασφαλίζει καλή ακουστική επαφή, με τη χρήση μιας αλοιφής και πιέζοντας τον πομπό καλά στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Κλασσικές αλοιφές είναι η βαζελίνη, το γράσο, το μαλακό σαπούνι και η πάστα καολίνης-γλυκερίνης. Είναι σημαντικό, όπως προαναφέρθηκε, να υπάρχει μόνο ένα πολύ λεπτό στρώμα αλοιφής, γι'αυτό θα πρέπει να γίνονται επαναλαμβανόμενες μετρήσεις μέχρι να ληφθεί μια ελάχιστη τιμή ώστε να καταστεί δυνατή η λεπτή εξάπλωση της αλοιφής.

Όταν η επιφάνεια του σκυροδέματος είναι τραχιά και ανισόπεδη, η περιοχή όπου θα εφαρμοστεί ο πομπός πρέπει να λειαίνεται. Εναλλάξ, ένα εξομαλυντικό μέσο όπως εποξειδική ρητίνη ή κονίαμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αλλά, η καλή πρόσφυση μεταξύ της επιφάνειας του σκυροδέματος και του εξομαλυντικού μέσου πρέπει να διασφαλιστεί, έτσι ώστε ο παλμός να διαδίδεται σωστά στο εξεταζόμενο σκυροδέμα. Η στρώση του εξομαλυντικού μέσου λοιπόν πρέπει να είναι όσο το δυνατόν λεπτότερη [33].

3.2.6. Παράγοντες Επιρροής των Μετρήσεων

Η παλμική ταχύτητα επηρεάζεται από τις ιδιότητες του σκυροδέματος που καθορίζουν την ελαστική του δυσκαμψία και την μηχανική του αντοχή, όπως η πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας, η θλιπτική αντοχή, η αναλογία υγρασίας και η παρουσία οπλισμών, ρωγμών ή κενών. Για παράδειγμα, όταν ο παλμός συναντά κενά στη διαδρομή του, το εύρος του μειώνεται και χρειάζεται περισσότερο χρόνο να διασχίσει το κενό. Για αυτό το λόγο, το μετρούμενο εύρος και η ταχύτητα λειτουργούν σαν μέσα εντοπισμού κενών και γενικότερα για την μελέτη της εσωτερικής κατάστασης του σκυροδέματος επιτρέποντας τον καθορισμό της έκτασης των ατελειών. Οι διακυμάνσεις που παρουσιάζονται σε ένα σύνολο μετρήσεων ταχύτητας σε διαφορετικές διαδρομές μιας κατασκευής αντικατοπτρίζει τη μεταβολή της κατάστασής του [34] [35].

Επιρροή της υγρασίας: Η περιεκτικότητα σε υγρασία έχει δύο συνέπειες για την παλμική ταχύτητα, μια χημική και μια φυσική. Οι επιδράσεις αυτές είναι σημαντικές για την παραγωγή των συσχετισμών για την εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος. Μεταξύ ενός σωστά διατηρημένου δοκιμίου και ενός στοιχείου μιας κατασκευής από το ίδιο σκυρόδεμα μπορεί να υπάρχει σημαντική διαφορά στη παλμική ταχύτητα. Μεγάλο μέρος της διαφοράς εξηγείται από την επίδραση των διαφορετικών συνθηκών ωρίμανσης για την ενυδάτωση του σκυροδέματος ενώ, ένα άλλο μέρος της διαφοράς οφείλεται στη παρουσία νερού στα κενά. Είναι σημαντικό αυτές οι επιρροές να λαμβάνονται προσεκτικά υπόψη κατά την εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος [34] [35].

Θερμοκρασία του σκυροδέματος: Μεταβολές στη θερμοκρασία του σκυροδέματος μεταξύ 10°C και 30 °C διαπιστώθηκε ότι δεν προκαλούν σημαντικές αλλαγές χωρίς την εμφάνιση αντίστοιχων αλλαγών στην αντοχή ή στις ελαστικές ιδιότητες. Διορθώσεις στη παλμική ταχύτητα θα πρέπει να γίνονται για θερμοκρασίες εκτός αυτού του εύρους σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3:

Πίνακας 3.3: συσχέτιση με τις παλμικές ταχύτητες [35]

Temperature	Correlation to the measured pulse velocity	
	Air dried concrete	Water saturated concrete
°C	%	%
60	+5	+4
40	+2	+1.7
20	0	0
0	-0.5	-1
-4	-1.5	-7.5

Μήκος διαδρομής: Το μήκος της διαδρομής κατά την οποία μετράται η παλμική ταχύτητα θα πρέπει να είναι αρκετά μακρύ, ώστε να μην επηρεάζεται σημαντικά από την ετερογενή φύση του σκυροδέματος. Συνιστάται ότι το ελάχιστο μήκος διαδρομής θα πρέπει να είναι 100 mm για σκυρόδεμα όπου το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος αδρανούς είναι 20 mm ή λιγότερο και 150 mm για σκυρόδεμα όπου το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος αδρανούς είναι 20 mm με 40 mm. Η παλμική ταχύτητα δεν επηρεάζεται γενικά από αλλαγές στο μήκος διαδρομής, αν και η ηλεκτρονική

συσκευή μπορεί να δείξει μια τάση για ελαφρά μείωση της ταχύτητας με αύξηση του μήκους διαδρομής. Αυτό συμβαίνει επειδή τα στοιχεία του παλμού με την υψηλότερη συχνότητα είναι πιο εξασθενημένα από τα στοιχεία με χαμηλότερη συχνότητα. Έτσι, η εμφανής μείωση της ταχύτητας παλμού προκύπτει από τη δυσκολία ακριβούς καθορισμού της έναρξης του παλμού και αυτό εξαρτάται από τη συγκεκριμένη μέθοδο που χρησιμοποιείται για το καθορισμό του. Αυτή η φαινομενική μείωση της ταχύτητας είναι συνήθως μικρή και σαφώς εντός της ανοχής της ακρίβειας μέτρησης του χρόνου για τον εξοπλισμό [34] [35].

Σχήμα και μέγεθος δοκιμίου: Η ταχύτητα των σύντομων παλμών της δόνησης είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος και το σχήμα του δοκιμίου μέσα στο οποίο ταξιδεύουν, εκτός εάν η ελάχιστη πλευρική του διάσταση είναι μικρότερη από μια ελάχιστη τιμή. Κάτω από αυτή τη τιμή η ταχύτητα του παλμού μπορεί να μειωθεί αισθητά. Η έκταση αυτής της μείωσης εξαρτάται κυρίως από τον λόγο του μήκους κύματος των παλμικών δονήσεων προς την ελάχιστη πλευρική διάσταση του δοκιμίου, αλλά είναι ασήμαντη αν αυτός ο λόγος είναι μικρότερος της μονάδας. Εάν η ελάχιστη πλευρική διάσταση είναι μικρότερη από το μήκος κύματος ή εάν χρησιμοποιείται η έμμεση διάδοση, ο τρόπος διάδοσης αλλάζει και επομένως, η μετρηθείσα ταχύτητα θα είναι διαφορετική. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν συγκρίνονται στοιχεία από σκυρόδεμα εντελώς διαφορετικών διαστάσεων [34] [35].

Επιρροή των οπλισμών: Η παλμική ταχύτητα που μετράται σε οπλισμένο σκυρόδεμα στη περιοχή των οπλισμών είναι συνήθως υψηλότερη από ότι σε άοπλο σκυρόδεμα ίδιας σύστασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παλμική ταχύτητα στο χάλυβα μπορεί να είναι διπλάσια από ότι σε άοπλο σκυρόδεμα και, υπό ορισμένες συνθήκες, ο πρώτος παλμός που φτάνει στον παραλήπτη πομπό ταξιδεύει εν μέρει στο σκυρόδεμα και εν μέρει στο χάλυβα. Η παρατηρούμενη αύξηση στη παλμική ταχύτητα εξαρτάται από τη διάμετρο και τον αριθμό των οπλισμών και το προσανατολισμό τους σε σχέση με τη διαδρομή διάδοσης. Η συχνότητα του παλμού και οι επιφανειακές συνθήκες του οπλισμού μπορεί αφενός να επηρεάζουν το βαθμό στον οποίο ο χάλυβας επηρεάζει τις μετρήσεις ταχύτητας. Διορθώσεις σε μετρούμενες τιμές λόγω οπλισμών θα μειώσουν την ακρίβεια της εκτιμώμενης παλμικής ταχύτητας στο σκυρόδεμα γι'αυτό, όποτε είναι δυνατόν, οι μετρήσεις θα

πρέπει να γίνονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο χάλυβας να μη βρίσκεται εντός ή κοντά στην άμεση διαδρομή μεταξύ των πομπών [36] [37].

Καθορισμός της ομοιομορφίας του σκυροδέματος: Ετερογένειες στο σκυρόδεμα εντός ή μεταξύ των μελών προκαλούν διακυμάνσεις στη παλμική ταχύτητα, οι οποίες με τη σειρά τους σχετίζονται με διακυμάνσεις στη ποιότητα. Οι μετρήσεις των παλμών ταχύτητας παρέχουν ένα μέσο για τη μελέτη της ομοιογένειας και για το σκοπό αυτό ένα σύστημα μετρήσεως των σημείων, που καλύπτει ομοιόμορφα τον κατάλληλο όγκο του σκυροδέματος στη κατασκευή, πρέπει να επιλεγεί. Ο αριθμός των μεμονωμένων δοκιμών εξαρτάται από το μέγεθος της κατασκευής, της ακρίβειας που απαιτείται και από την ομοιογένεια του σκυροδέματος. Σε μια μεγάλη μονάδα σχετικά ομοιογενούς σκυροδέματος, δοκιμές σε πλέγμα 1 m είναι συνήθως επαρκείς αλλά, για μικρές μονάδες ή ανομοιογενές σκυρόδεμα, ένα καλύτερο πλέγμα μπορεί να είναι απαραίτητο. Πρέπει να σημειωθεί ότι, στις περιπτώσεις όπου το μήκος της διαδρομής είναι ίδιο σε όλη την έρευνα, ο μετρούμενος χρόνος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει την ομοιομορφία του σκυροδέματος, χωρίς την ανάγκη να μετατραπεί σε ταχύτητα. Αυτή η τεχνική είναι κατάλληλη για έρευνες όπου όλες οι μετρήσεις γίνονται με έμμεσους τρόπους μέτρησης.

Είναι δυνατόν να εκφράσουμε την ομοιογένεια με τη μορφή μιας στατιστικής παραμέτρου όπως η τυπική απόκλιση ή ο συντελεστής διακύμανσης των μετρήσεων παλμικής ταχύτητας που πραγματοποιήθηκαν εντός του πλέγματος. Ωστόσο, αυτές οι παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα μόνο όταν συγκρίνουν διακυμάνσεις σε μονάδες σκυροδέματος με ανάλογες διαστάσεις. Οι αποκλίσεις στη παλμική ταχύτητα επηρεάζονται από το μήκος διαδρομής επειδή αυτό προσδιορίζει το ουσιαστικό μέγεθος του δείγματος του σκυροδέματος, το οποίο βρίσκεται υπό εξέταση κατά τη διάρκεια της κάθε μέτρησης. Η σημασία των τροποποιήσεων θα πρέπει να κρίνεται σε σχέση με το αποτέλεσμα το οποίο αναμένεται να έχουν στην απαιτούμενη συμπεριφορά του δομικού στοιχείου που εξετάζεται. Αυτό σημαίνει γενικά ότι το όριο ανοχής που επιτρέπεται για την ποιότητα διανομής εντός των μελών, πρέπει να σχετίζεται είτε με τη κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό τους υπό συνθήκες κρίσιμου φορτίου λειτουργικότητας είτε με έκθεση σε συνθήκες [35].

3.2.7. Χρήσεις υπερήχων

3.2.7.1. Εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων

Υπολογίζοντας τους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν το εύρος και το χρόνο μεταφοράς, οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος σε σχέση με τη ταχύτητα διάδοσης του κύματος μέσα από αυτό, ως ένδειξη ποιότητάς του. Η μέθοδος ωστόσο χρησιμοποιείται πιο συχνά για συγκριτικές μελέτες, όπως για παράδειγμα την αύξηση της διάβρωσης σε κατασκευές από σκυρόδεμα, παρά για ποιοτική εκτίμηση αντοχής σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί για ανάλυση. Άλλες εφαρμογές είναι ο προσδιορισμός άλλων μηχανικών ιδιοτήτων, όπως το μέτρο ελαστικότητας E , μέτρο διατμήσεως G και ο λόγος Poisson ν , χωρίς να απαιτείται η κατασκευή και η θραύση ειδικών δοκιμίων και ακόμα η μέτρηση, με ικανοποιητική ακρίβεια, του πάχους των υλικών σε κατασκευές. Μία σχέση που έχει βρεθεί για παράδειγμα για το μέτρο ελαστικότητας είναι η εξής:

$$E_d = \frac{\rho v^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Όπου

E_d είναι το μέτρο ελαστικότητας (MN/m^2)

ν είναι ο συντελεστής Poisson

ρ είναι η πυκνότητα (kg/m^3)

V είναι η παλμική ταχύτητα (km/s)

Εάν είναι γνωστά ο συντελεστής Poisson και η πυκνότητα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παραπάνω εξίσωση για να καθοριστεί το μέτρο ελαστικότητας στο σκυρόδεμα, για μεγάλο εύρος μεγεθών και σχήματος. Αυτό γίνεται εξαιτίας του γεγονότος ότι η παλμική ταχύτητα δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις διαστάσεις του δοκιμίου, εκτός εάν μια ή περισσότερες πλευρικές διαστάσεις είναι μικρές σχετικά με το μήκος κύματος του παλμού. Ομοίως εάν γνωρίζουμε το μέτρο ελαστικότητας και το συντελεστή Poisson μπορούμε να υπολογίσουμε τη παλμική ταχύτητα.

Η τελευταία εφαρμογή είναι μεγάλης σημασίας και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για την μέτρηση του πάχους των κατασκευών όταν αυτό δε μπορεί να μετρηθεί με τα μηχανικά μικρόμετρα ή παχύμετρα. Χρησιμοποιείται ακόμη για τον έλεγχο και τον προσδιορισμό της ποιότητας των συγκολλήσεων και αποτελεί μη συμβατική μέθοδο κατεργασίας (NMT), αφαιρέσεως και κοπής μετάλλου. Τέλος, βρίσκει εφαρμογές σε άλλες επιστήμες όπως την ιατρική και τη ναυπηγική. [34]

Στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1951, ο Whitehurst δημοσίευσε τον Πίνακα 3.5. ως ένδειξη της ποιότητας του σκυροδέματος σε σχέση με τη παλμική ταχύτητα:

Πίνακας 3.5

ΠΑΛΜΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ, m/s	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
ΠΑΝΩ ΑΠΟ 4570	ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΗ
3660 - 4570	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ
3050 - 3660	ΜΕΤΡΙΑ
2130 - 3050	ΚΑΚΗ
ΚΑΤΩ ΑΠΟ 2130	ΠΟΛΥ ΚΑΚΗ

Ωστόσο, ο Whitehurst [38] προειδοποίησε ότι αυτές οι τιμές προέκυψαν από τον έλεγχο φυσιολογικού σκυροδέματος πυκνότητας περίπου 2400 kg/m^3 και τα όρια μεταξύ των συνθηκών δε μπορούν να καθοριστούν με ακρίβεια. Επίσης τόνισε ότι αντί για αυτά τα όρια η πιο σημαντική σύγκριση πρέπει να είναι η ταχύτητα σε σημεία της κατασκευής που είναι γνωστό ότι είναι αποδεκτής ποιότητας. Παρόλα αυτά, ο παραπάνω πίνακας χρησιμοποιήθηκε αρκετά από μη έμπειρους ερευνητές σα μόνη βάση για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

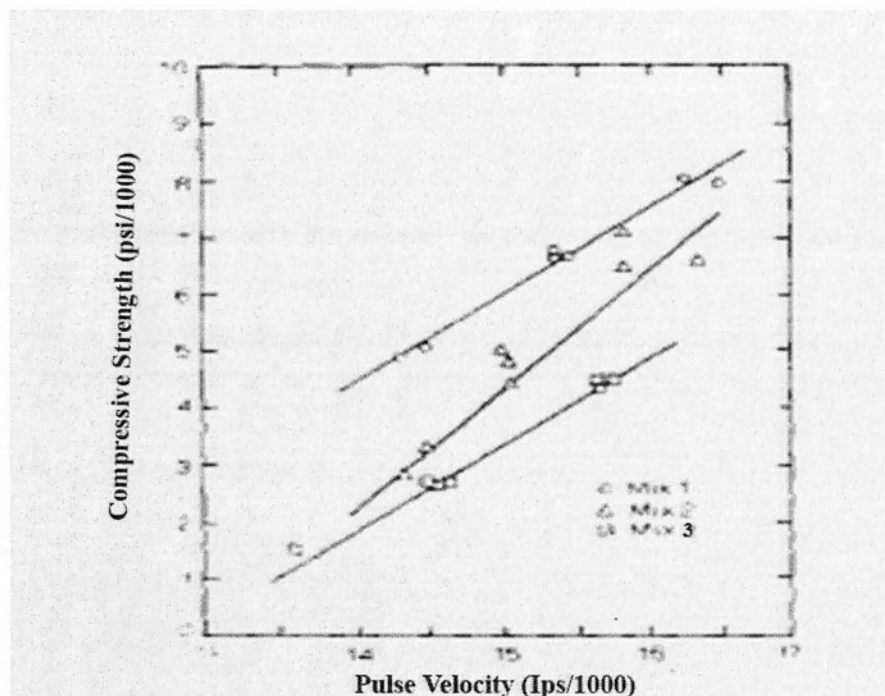
Στη μέθοδο των κυμάτων αιφνίδιας αναταραχής υπάρχουν συχνότητες από 30 έως 17000 Hz, ενώ στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους συναντούμε συχνότητες έως 200 kHz. Στο συνηθισμένο πείραμα ένας μικρής διάρκειας παλμός εκπέμπεται στο σκυρόδεμα. Ο χρόνος που χρειάζεται να διανύσει την απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη, οι οποίοι βρίσκονται σε γνωστή απόσταση μεταξύ τους, μετράται. Παλιότερα οι μετρήσεις παρουσιάζονταν σε ένα παλμογράφο, ωστόσο, ο Elvery και ο Vale [39] αναφέρουν την ανάπτυξη του PUNDIT (portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester), ο οποίος απλά δείχνει το χρόνο. Η μέθοδος αιφνίδιας διαταραχής χρησιμοποιείται με επιτυχία σε φράγματα πάχους έως και 75 ft

(22,86 m) ενώ οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται σε πάχος έως και 7 ft (2,13 m).

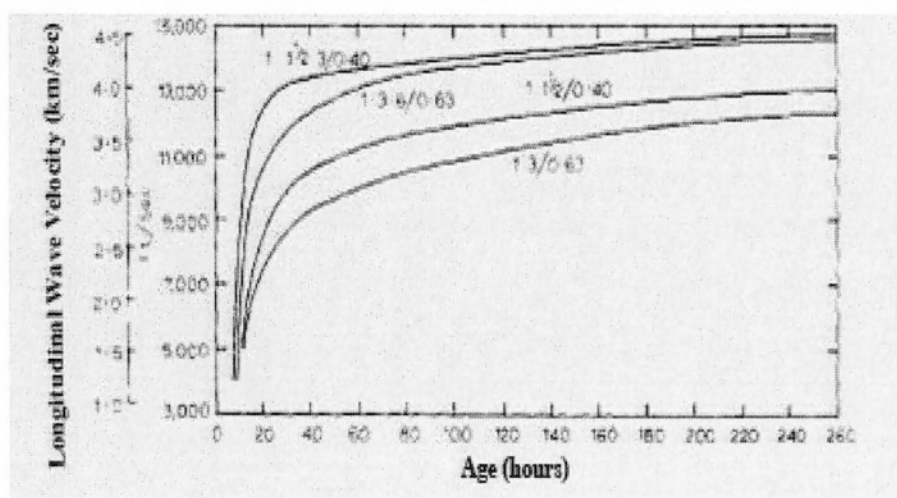
Η σχέση μεταξύ παλμικής ταχύτητας και θλιπτικής αντοχής φαίνεται στο Σχήμα 3.16 για τρία διαφορετικά δοκίμια. Αυτά τα αποτελέσματα αποσκοπούν στο να δώσουν έμφαση στο γεγονός ότι δεν υπάρχει καμία γενική έκφραση που να συνδέει αυτές τις δύο ιδιότητες του σκυροδέματος. Η μέθοδος των ηλεκτρομαγνητικών παλμών ξεκίνησε να διαδίδεται από το 1945. Η ταχύτητα του διαμήκου κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν κριτήριο ποιότητας σκυροδέματος. Η μέθοδος χρησιμοποιείται στο εργαστήριο για να καθορίσει την έναρξη της ρωγμής σε υπό εξέταση δοκίμια. Επιπλέον, χρησιμοποιείται σε πραγματικές κατασκευές ή πεζοδρόμια για να καθορίσει τη θέση και την έκταση των ρωγμών. Έχει δηλαδή το πλεονέκτημα της άμεσης συσχέτισης με το σκυρόδεμα της δομής και όχι με πυρήνες ή δείγματα που μπορεί να μην είναι πάντοτε αντιπροσωπευτικά. Μια μεγάλη αναλογία της ενέργειας του κύματος απορροφάται από μια ρωγή με αποτέλεσμα να δίνει χαμηλότερη ταχύτητα λόγω του μεγαλύτερου μονοπατιού. Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για επαναλαμβανόμενες δοκιμές ώστε να παρατηρηθεί η πρόοδος κάποιων ενεργειών στο σκυρόδεμα όπως η ενυδάτωση ή η διάβρωση λόγω παγετού.

Πολλές μεταβλητές επηρεάζουν τη ταχύτητα του κύματος στο σκυρόδεμα και για αυτό το λόγο το μηχάνημα θα πρέπει να ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε να δίνει την επιθυμητή ιδιότητα του σκυροδέματος μέσω της ταχύτητας του κύματος. Έτσι, είναι απαραίτητο να λαμβάνουμε δοκίμια από μια υφιστάμενη κατασκευή εάν θέλουμε να αποτιμήσουμε την ποιότητα του σκυροδέματός της.

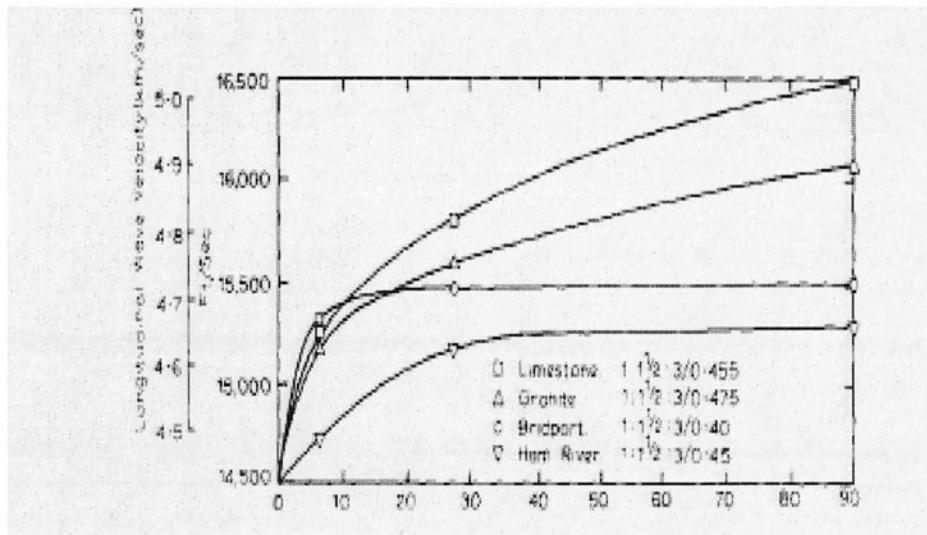
Το σχήμα 3.17 δείχνει την επιρροή της ηλικίας του δοκιμίου στη ταχύτητα του κύματος. Το σχήμα 3.18 δείχνει ότι η σχέση μεταξύ αντοχής και ταχύτητας κύματος εξαρτάται πολύ από την αναλογία αδρανών/τσιμέντου χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο αδρανές [40].



Σχήμα 3.16 : Σύγκριση παλμικών ταχυτήτων με αντοχές για ξεχωριστά δοκίμια [40].



Σχήμα 3.17: Επιρροή ηλικίας δοκιμίου στη ταχύτητα του κύματος [40].

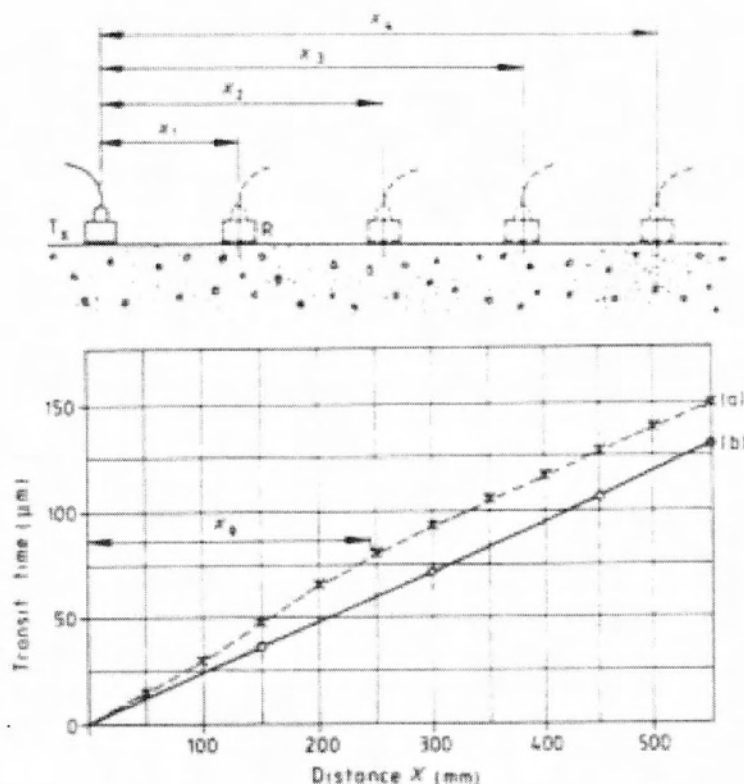


Σχήμα 3.18: Επιρροή αναλογίας αδρανών/τσιμέντου στη ταχύτητα του κύματος [40].

3.2.7.2. Εκτίμηση Πάχους Στρώσης Κατώτερης Ποιότητας

Εάν υπάρχει υποψία ότι το σκυρόδεμα έχει μια επιφανειακή στρώση κακής ποιότητας εξαιτίας κακοτεχνίας, φωτιάς, παγετού ή θευκή διάβρωση, το πάχος αυτής της στρώσης μπορεί να εκτιμηθεί από μετρήσεις των χρόνων διέλευσης υπερήχων κατά μήκος της επιφάνειας.

Η τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η τοποθέτηση του ενός πομπού σε ένα συγκεκριμένο σημείο στην επιφάνεια και του άλλου σε απόσταση x_1 από τον πρώτο. Μετράται ο χρόνος διέλευσης και μετά γίνεται η ίδια διαδικασία για αποστάσεις x_2 , x_3 κλπ. Οι χρόνοι διέλευσης παριστάνονται σε διάγραμμα με την απόσταση όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα στο οποίο $x=50$ mm.



Σχήμα 3.19

Στην ελάχιστη απόσταση διαχωρισμού των πομπών, ο παλμός ταξιδεύει μέσα από την επιφανειακή στρώση και η κλίση του διαγράμματος δίνει τη παλμική ταχύτητα σε αυτή την επιφανειακή στρώση. Πέρα από μια συγκεκριμένη απόσταση διαχωρισμού, ο πρώτος παλμός που φτάνει έχει περάσει από την υποκείμενη στρώση υψηλότερης ποιότητας σκυροδέματος και η κλίση αυτών των πειραματικών σημείων δίνει τη ταχύτητα στο σκυρόδεμα. Η απόσταση x_0 στην οποία συμβαίνει η αλλαγή κλίσης λόγω των μετρούμενων παλμικών ταχυτήτων σε δύο διαφορετικές στρώσεις, επιτρέπει την εκτίμηση του πάχους t (mm) της επιφανειακής στρώσης σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$t = \frac{x_0}{2} \sqrt{\frac{(v_s - v_d)}{(v_s + v_d)}}$$

Όπου

v_d είναι η παλμική ταχύτητα του κατεστραμμένου σκυροδέματος (km/s)

v_s είναι η παλμική ταχύτητα στην από κάτω στρώση (km/s)

x_0 η απόσταση αλλαγής κλίσης από τον πρώτο πομπό (mm)

Η μέθοδος εφαρμόζεται σε εκτεταμένες επιφάνειες στις οποίες το κατώτερο σκυρόδεμα σχηματίζει μια διακριτή στρώση αρκετού πάχους. Ζώνες φθαρμένου ή εξασθενημένου σκυροδέματος είναι πιο δύσκολες για έλεγχο, αλλά είναι δυνατόν να καθοριστεί μια προσέγγιση του πάχους αυτών των περιοχών, εφόσον γίνουν οι μετρήσεις άμεσης διάδοσης και επιφανειακής διάδοσης [35].

3.2.7.3. Αξιολόγηση των Ζημιών από Πυρκαγιά

Εκτεταμένη έρευνα πάνω στις βλάβες που προκαλούνται στο σκυρόδεμα λόγω πυρκαγιάς και στις μεθόδους αξιολόγησης της θερμικής αυτής βλάβης έχει πραγματοποιηθεί στο πανεπιστήμιο του Μιλάνου. Αποτέλεσμα της έρευνας αποτελεί η χρήση 3 μεθόδων για το σκοπό αυτό, και συγκεκριμένα μια απλοποιημένη τεχνική χρήσης υπερήχων, η προσέγγιση της χρωματομετρίας του σκυροδέματος και η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της αντίστασης γεώτρησης.

Το σκυρόδεμα θεωρείται γενικά ότι έχει πολύ καλή συμπεριφορά στη φωτιά. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι από τη φύση του είναι άφλεκτο και επίσης εγγυάται την αργή μετάδοση της θερμότητας μέσα στο υλικό. Μόνο σε περιπτώσεις που η φωτιά έχει μεγάλη διάρκεια και το στοιχείο είναι σχετικά λεπτό μπορούμε να ανησυχούμε για πιθανή σημαντική μείωση της αντοχής του στοιχείου [41]. Μία σημαντική εξαίρεση σε όλα τα παραπάνω είναι η εμφάνιση εκρηκτικών θραύσεων, που συμβαίνει λόγω της υψηλής πίεσης που προκαλείται από τους ατμούς και επομένως την ευκολότερη μετάδοση της θερμότητας. Το φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται συνήθως σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (<400 °C) λόγω της σημαντικής διάβρωσης της επιφάνειας του υλικού. Το αποτέλεσμα της θέρμανσης είναι η πραγματοποίηση μιας σειράς χημικό-φυσικών αντιδράσεων στο εσωτερικό του σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της αύξησης της θερμοκρασίας [42]. Το νερό απελευθερώνεται σε θερμοκρασία πάνω από 100 °C, το πυριτικό ένυδρες αποσυντίθεται σε θερμοκρασία πάνω από 300 °C, ενώ ορισμένα αδρανή αρχίζουν να αποσυντίθενται σε θερμοκρασίες άνω των 500 °C. Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού αρχίζουν να αλλάζουν και κυρίως η αντοχή να μειώνεται αργά μέχρι τους 400 °C και πιο έντονα πάνω από αυτή τη θερμοκρασία. Οι μειώσεις των μηχανικών ιδιοτήτων αλλάζουν δυναμικά ανάλογα με το σχεδιασμό του

μίγματος, με τις συνθήκες ψύξης και φυσικά με τις ήδη υπάρχουσες τάσεις και ρωγμές. Επομένως δεν μπορούμε να έχουμε μια μόνιμη σχέση που να συνδέει την θερμοκρασία που αναπτύσσεται με την απομένουσα αντοχή στο υλικό. Παρόλα αυτά σε περιπτώσεις που καταρρέει ένα όχι καθοριστικό μέλος της κατασκευής, παρουσιάζει ενδιαφέρον η αξιολόγηση των υπόλοιπων μελών και η εξαγωγή συμπερασμάτων για σωστές επιδιορθώσεις και ενισχύσεις. Από τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, σημαντική μείωση παρουσιάζεται στο μέτρο ελαστικότητας E , και λιγότερο σημαντικές μεταβολές σε χαρακτηριστικά όπως η πυκνότητα, οι μικρό-ρωγμές, το χρώμα του σκυροδέματος κλπ [43].

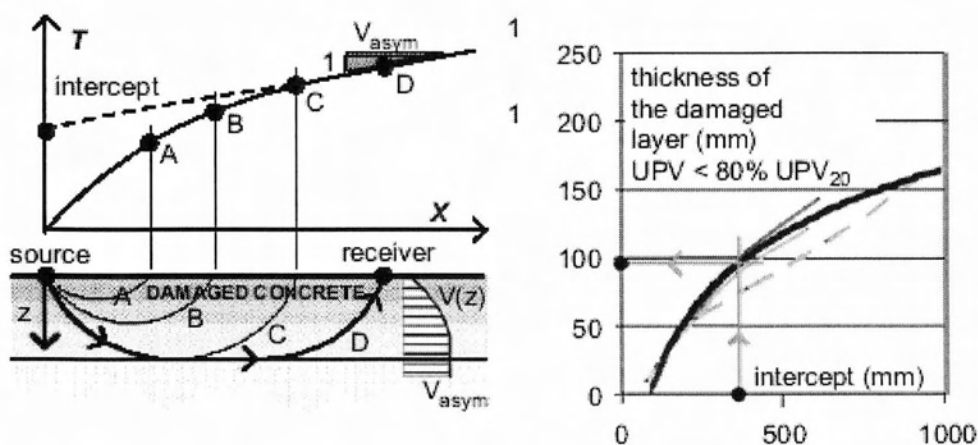
Όλες οι παραπάνω μεταβολές μπορούν να εντοπιστούν ικανοποιητικά μέσω των μη-καταστροφικών μεθόδων, αν και δεν πρέπει να αγνοούμε ότι οι συγκεκριμένες μέθοδοι δεν δίνουν πάντα αξιόλογα αποτελέσματα σε ανομοιογενή υλικά.

Η πιθανή προσέγγιση του προβλήματος περιλαμβάνει είτε την εκτίμηση της μέσης τιμής της απόκρισης του σκυροδέματος [44] [45], είτε την ανάλυση σημείο προς σημείο σε μικρά δοκίμια και σε διαφορετικά βάθη [46] [47] [48] είτε την χρήση ειδικών τεχνικών για την εκτίμηση της συνολικής απόκρισης του μέλους σκυροδέματος [48] [49] [50].

Το μειονέκτημα είναι ότι οι περισσότερες από τις παραπάνω μεθόδους δεν είναι επαρκείς για μελέτη υφιστάμενων κατασκευών είτε γιατί είναι γρήγορες μεν αλλά δίνουν πρόχειρα αποτελέσματα (rebound hammer), είτε δίνουν ακριβή αποτελέσματα αλλά είναι χρονοβόρα (ανάλυση σημείο προς σημείο).

Στην αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων επικεντρώθηκε μια μελέτη του πανεπιστήμιου του Μιλάνου, το οποίο ασχολήθηκε με την εύρεση καινοτόμων διαδικασιών για την βελτίωση της πυρασφάλειας σε υφιστάμενα τούνελ. Ο διπλός στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι να αξιολογήσει τις μη-καταστροφικές μεθόδους και να προτείνει γρήγορες και ακριβείς τρόπους για την αξιολόγηση των ζημιών από πυρκαγιά σε μέλη σκυροδέματος [51]. Όσον αφορά τον 2^ο στόχο προτάθηκαν 3 τεχνικές για την αξιολόγηση της ζημιάς που έχει υποστεί το σκυρόδεμα, οι οποίες πραγματοποιούνται σε μικρό χρονικό διάστημα, δεν απαιτούν πολυδάπανα μηχανήματα, και επίσης δεν απαιτούν δύσκολες αναλύσεις στο εργαστήριο. Τα αποτελέσματα της έρευνας και της αξιολόγησης των μεθόδων θα τα δούμε παρακάτω.

Όπως γνωρίζουμε, η ταχύτητα διάδοσης του κύματος μέσα στο υλικό επηρεάζεται σημαντικά από την πυρκαγιά λόγω των στεγνών πόρων που δημιουργούνται. Παράλληλα, σημαντικά συμπεράσματα μπορούμε να εξάγουμε λόγω της ευαισθησίας του μέτρου ελαστικότητας στη φωτιά. Τις διάφορες πληροφορίες που χρειαζόμαστε, τις εξάγουμε μέσω της διάθλασης των κυμάτων μέσα στο υλικό [52]. Βέβαια, το να εκτιμήσουμε το προφίλ της ταχύτητας μέσα σε ένα υλικό που έχει υποβληθεί σε υψηλές θερμοκρασίες είναι μια αρκετά δύσκολη διαδικασία. Τοποθετούμε τους ανιχνευτές (πομπό και δέκτη) στην ίδια επιφάνεια και υπολογίζουμε το χρόνο διάδοσης του κύματος. Γνωρίζοντας ότι μετά τη φωτιά η ταχύτητα διάδοσης του κύματος αυξάνεται με το βάθος, το μονοπάτι που θα ακολουθήσουν τα κύματα δείχνουν την ιδανική λύση μεταξύ της μικρότερης απόστασης καθώς το κύμα μεταδίδεται σε μικρά βάθη, και της μεγαλύτερης ταχύτητας καθώς μεταδίδεται σε μεγαλύτερα βάθη. Το μέγιστο βάθος που θα μεταδοθεί το κύμα αποτελεί συνάρτηση της απόστασης X μεταξύ των ανιχνευτών. Επομένως, καθώς αυξάνουμε την απόσταση X και επαναλαμβάνοντας τις μετρήσεις μπορούμε να μελετήσουμε το στοιχείο σε διάφορα βάθη. (Σχήμα 3.20). Η ερμηνεία του διαγράμματος $X-T$ που προκύπτει αποτελεί πεδίο μελέτης για αρκετές αριθμητικές μεθόδους [49] [50].



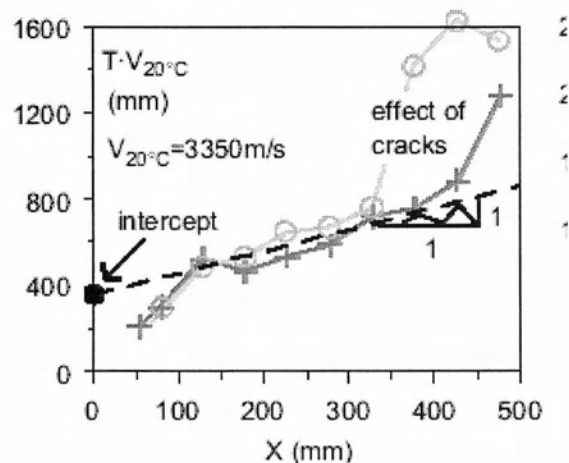
Σχήμα 3.20: Αύξηση απόστασης X για μελέτη σκυροδέματος σε διάφορα βάθη.

Μια σημαντική ιδιότητα του διαγράμματος αυτού είναι η V_{asym} που εμφανίζεται στα χαμηλά στρώματα του στοιχείου και αντιστοιχεί στις μεγάλες τιμές T . Η

ταχύτητα αυτή ισοδυναμεί συνήθως με την $V_{20\text{C}}$ του αρχικού στοιχείου (για λεπτά μέλη και σχετικά μικρής διάρκειας φωτιάς). Πολλαπλασιάζοντας τις τεταγμένες με τη V_{asym} κάνουμε κανονικοποίηση του διαγράμματος και η μέγιστη τιμή των τεταγμένων είναι η μονάδα. Τώρα στο διάγραμμα θα ασχολούμαστε με τη σχετική ταχύτητα $V(z)/V_{\text{asym}}$ για να παίρνουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Ανάμεσα στις γεωμετρικές ιδιότητες που εμφανίζονται στο διάγραμμα αυτό, ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει το σημείο που αντιστοιχεί στο $X=0$, το οποίο μας δίνει πληροφορίες για το χρόνο καθυστέρησης καθώς το κύμα κινείται στα μικρού βάθους στρώματα του στοιχείου. Η καθυστέρηση αυτή σχετίζεται άμεσα από το πάχος του σκυροδέματος που έχει υποστεί σημαντική ζημιά (20% καθυστέρηση έχει υποθεθεί στη συγκεκριμένη μελέτη, βλ Σχήμα 3.20).

Η μέθοδος αυτή αν και αποδείχτηκε ότι εξάγει σημαντικά συμπεράσματα, έχει το μειονέκτημα ότι έχει εν τέλει πολλές απαιτήσεις. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται σε περιπτώσεις ύπαρξης ρωγμών, οι οποίες μπορεί να καθυστερήσουν το κύμα και να αλλάξουν την κυρτότητα της καμπύλης. Αυτό τονίζεται στο Σχήμα 3.21, όπου οι τεταγμένες είναι πολλαπλασιασμένες με την $V_{20\text{C}}$ και μπορούμε να δούμε την επιρροή των ρωγμών.



Σχήμα 3.21: Επιρροή ρωγμών στην ταχύτητα του κύματος.

3.2.8. Προδιαγραφές

Σύμφωνα με το **Βρετανικό κανονισμό** για να κατασκευαστεί μια αξιόπιστη καμπύλη απαιτούνται τουλάχιστον 3 δοκίμια.. Η ταχύτητα υπολογίζεται τοποθετώντας τους πομπούς απέναντι και χρειαζόμαστε τουλάχιστον 3 μετρήσεις μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής . Η απόκλιση των μετρήσεων δεν πρέπει να ναι πάνω από 5% από την μέση τιμή των 3 αυτών μετρήσεων . Η μέση τιμή της ταχύτητας και η μέση τιμή της αντοχής για κάθε δοκίμιο διατηρούνται με στόχο τη δημιουργία της καμπύλης . Η καμπύλη αυτή προϋποθέτει δοκίμια με πανομοιότυπη σύσταση , τα οποία υποβάλλονται ακριβώς στις ίδιες δοκιμές.

Στην περίπτωση που θέλουμε να δημιουργήσουμε μια καμπύλη από δοκίμια που έχουμε πάρει από την κατασκευή μας πρέπει να χωρίσουμε την κατασκευή σε ζώνες με διαφορετική ποιότητα και χαρακτηριστικά σκυροδέματος .

-Η **RILEM** περιγράφει την διαδικασία με παρόμοιο τρόπο με το Βρετανικό κανονισμό.

-Ο κανονισμός **ASTM** και το **DIN/ISO** δεν δίνουν πληροφορίες.

-Αντίθετα, πληροφορίες δίνονται στο **Dafstb**. Συγκεκριμένα επισημαίνει ότι μπορούμε να σχεδιάσουμε μια αξιόπιστη καμπύλη αν πάρουμε και μετρήσουμε δοκίμια από την κατασκευή. Πρέπει να χωρίσουμε την κατασκευή σε ζώνες χαμηλής , μέσης και υψηλής ταχύτητας και από αυτές τις περιοχές να πάρουμε τα δοκίμια που χρειαζόμαστε . Τρεις με πέντε μετρήσεις πρέπει να πάρουμε σε κάθε μια από τις ζώνες αυτές . Αν το δοκίμιο είναι μικρό (50 mm) ίσως χρειαστούν περισσότερα από 6 δοκίμια για αξιόπιστα αποτελέσματα . Αυτό που γίνεται στη συνέχεια είναι να συνδέσουμε τις ταχύτητες που μας δίνει το μηχάνημα με τις αντοχές του σκυροδέματος.. Εδώ προτείνεται η γραμμική συσχέτιση των 2 αυτών μεγεθών .

- Σύμφωνα με τον κανονισμό **GOST** πραγματοποιούμε τις μετρήσεις σε δοκίμια 200x200x200 mm ,υπολογίζουμε τις μέσες τιμές της ταχύτητας για κάθε δοκίμιο και στη συνέχεια προσδιορίζουμε την αντοχή του καταστροφικά (ουσιαστικά η ίδια διαδικασία που έχουμε δει μέχρι τώρα). Έτσι μπορούμε να σχεδιάσουμε την

καμπύλη που θέλουμε . Για κάθε είδος σκυροδέματος χρειαζόμαστε διαφορετική σχέση μεταξύ ταχυτήτων και αντοχών ενώ για κάθε είδος σύμφωνα με τη GOST πρέπει να ελέγχουμε τουλάχιστον 15 δοκίμια .

Σε περίπτωση που στην κατασκευή μας δεν μπορούμε να τοποθετήσουμε το πομπό που στέλνει το κύμα και αυτόν που το λαμβάνει απέναντι ,πρέπει να ακολουθήσουμε την εξής διαδικασία . Κάνουμε μετρήσεις σε τουλάχιστον 6 πρίσματα διαστάσεων 100x100x200mm και με άμεση διάδοση του κύματος και με έμμεση διάδοσης .Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζουμε τον συντελεστή μετατροπής από τη σχέση

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i$$

όπου,

K_i η τιμή του συντελεστή μετατροπής του κάθε δοκιμίου .

Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται για κάθε δοκίμιο από τη σχέση

$$K_i = \frac{v_i}{v_{i\text{sur}}}$$

όπου,

v_i και $v_{i\text{sur}}$ οι μέσες τιμές ταχύτητας του κάθε δοκιμίου για άμεση και έμμεση μέτρηση αντίστοιχα .

Έχοντας υπολογίσει τον συντελεστή μετατροπής μπορούμε να κάνουμε όχι

απευθείας μέτρηση στην κατασκευή και μέσω της ταχύτητας $v = K \frac{l}{t_{\text{sur}}}$ να

υπολογίσουμε την αντοχή της , όπου t_{sur} ο χρόνος που κάνει το κύμα να διανύσει αυτήν την απόσταση (στην όχι απευθείας διάδοση) και l το μήκος που διανύει σε mm

. Σύμφωνα με τη GOST η σχέση που συνδέει τις ταχύτητες των κυμάτων με τις αντοχές του σκυροδέματος μπορεί να ναι είτε γραμμική είτε εκθετική . Η γραμμική προσέγγιση είναι πιο αξιόπιστη για χαμηλές αντοχές του σκυροδέματος και έχει τη μορφή $R_c = a_0 + a_1 v$

Όταν $R_{\text{max}} - R_{\text{min}} < 2R_{\text{ave}}(60 - R_{\text{ave}})/100$.

Αντίθετα για υψηλότερες τιμές αντοχής του σκυροδέματος παίρνουμε εκθετική συνάρτηση της μορφής

$$R_c = b_0 e^{\beta_1 v}$$

Όπου,

R_c η μέση τιμή της αντοχής των δοκιμίων

R_{max} and R_{min} η μέγιστη και η ελάχιστη τιμές αντίστοιχα

v η ταχύτητα του κύματος

$\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1$ οι σταθερές απομοίωσης.

- Η **Σλοβάκικη προδιαγραφή** προτείνει διάφορα σημεία –κλειδιά για τον προσδιορισμό της εξίσωσης που θα συνδέει τις ταχύτητες των κυμάτων με τις αντοχές του σκυροδέματος :

α)για να κατασκευάσουμε την καμπύλη χρειαζόμαστε τουλάχιστον 3 με 4 σημεία , καθένα από τα οποία θα αποτελεί τη μέση τιμή τουλάχιστον 6 δοκιμίων

β)για να δημιουργήσουμε όμως σχέσεις που καλύπτουν 2 η περισσότερες κατηγορίες σκυροδέματος χρειαζόμαστε 5 με 6 σημεία ,καθένα από τα οποία απαιτεί 6 δοκίμια .

γ) για να δημιουργήσουμε γενική σχέση που να καλύπτει μεγάλο αριθμό κατηγοριών σκυροδέματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά χρειαζόμαστε τουλάχιστον 50 δοκίμια για κάθε κατηγορία . Στη μέθοδο αυτή χρειαζόμαστε για χαρακτηρισμό τον συντελεστή α

δ)τέλος για να δημιουργήσουμε σχέσεις των κατηγοριών του σκυροδέματος που σχετίζονται με την κατασκευή χρειαζόμαστε τον έλεγχο τουλάχιστον 50 δοκιμίων .

Και σε αυτή την περίπτωση χρειαζόμαστε τον ίδιο συντελεστή α

** Για να καταφέρουμε να προσδιορίσουμε τον συντελεστή α πρέπει να διατηρήσουμε:

i) Τουλάχιστον 9 δοκίμια ίδιας κατηγορίας σκυροδέματος που να παρασκευασμένα όπως το σκυροδέμα της κατασκευής που μελετάμε.

ii) Να πάρουμε πυρήνες από την κατασκευή. Συγκεκριμένα, τουλάχιστον 3 πυρήνες για όγκο σκυροδέματος 10m^3 , 6 πυρήνες για όγκο μέχρι 50m^3 και 9 πυρήνες για όγκο μεγαλύτερο από 50m^3 . Άρα ο συντελεστής α σε αυτήν την περίπτωση δίνεται από τη σχέση

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n R_{ci}}{\sum_{i=1}^n R_{cei}}$$

όπου,

R_{ci} η αντοχή του σκυροδέματος μέσω καταστροφικού πειράματος

R_{cei} η αντοχή που προκύπτει από τη μέθοδο υπερήχου

n ο αριθμός των δοκιμίων που ελέγχθηκαν

Ο χρόνος μετάδοσης του κύματος πρέπει να μετρηθεί τουλάχιστον σε 3 διαφορετικά ύψη του δοκιμίου και η απόκλιση των ταχυτήτων να μην αποκλίνει περισσότερο από 5 % από τη μέση τιμή .

Η **Ουγγρική προδιαγραφή** είναι η μόνη που παρέχει τύπους με αριθμητικούς συντελεστές για τον υπολογισμό της αντοχής. Η μέθοδος υπολογισμού εξαρτάται από το ποιά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος μετρούνται

i) ταχύτητα παλμού και μόνο

ii) ταχύτητα παλμού και άλλα χαρακτηριστικά του

σκυροδέματος συμπεριλαμβανομένου του τύπου του τσιμέντου, του μεγέθους των αδρανών, του λόγου νερού προς τσιμέντο , της υγρασίας κλπ

iii) ταχύτητα παλμού και επιπλέον μετρήσεις αντοχής σε δοκίμια.

Για παράδειγμα στην περίπτωση (ii) οι υπολογισμοί βασίζονται στον τύπο

$$\log R_{21M} = 2.407 - (6.8 - \sum \Delta) 10^{-4} (5760 - \nu)$$

- όπου R_{2000} η υπολογισμένη αντοχή δοκιμίου διαστάσεων 20cm η κάθε πλευρά
- v η ταχύτητα του κύματος
- $\Sigma\Delta$ το άθροισμα παραμέτρων που εξαρτώνται από τα διάφορα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος

Πρακτικά χρησιμοποιούμε $\Delta=0$ όταν το μέγιστο αδρανές είναι 32mm και 0,5 όταν είναι 16mm. Επίσης παίρνουμε $\Delta=0$ όταν έχουμε περιεκτικότητα τσιμέντου 200 kg/m³ και $\Delta=0,3$ όταν η περιεκτικότητα είναι 400 kg/m³.

Το ενδιαφέρον στη χρήση υπερήχου προέρχεται από την άνετη μεταφορά και μεταβλητότητά του. Οι συσκευές έχουν μικρό κόστος και βάρος, δεν επηρεάζει τις ιδιότητες των ελεγχόμενων υλικών και το σημαντικότερο είναι ότι αποτελεί μια πειραματική μέθοδο εντελώς ακίνδυνη για την υγεία του ανθρώπου. Σίγουρα θα χρησιμοποιούνται κατά κόρον στο μέλλον [52-58].

3.3. Συνδυασμός Μεθόδων

3.3.1. SONREB

Μια μεγάλη ανακάλυψη από τους πολλούς ερευνητές τη δεκαετία του 50 και 60 των συσχετισμών μεταξύ αντοχής και μη-καταστροφικών ελέγχων, ήταν ότι κανένας έλεγχος δε μπορούσε να φτάσει το επίπεδο εμπιστοσύνης ώστε να καθορίζεται η ποιότητα του σκυροδέματος. Ο Hence κατέβαλλε προσπάθειες να πραγματοποιήσει συνδυαστικές μεθόδους, στις οποίες δύο ή περισσότεροι μη-καταστροφικοί έλεγχοι χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος. Η υποκείμενη ιδέα είναι ότι αν δύο μέθοδοι επηρεάζονται με διαφορετικούς τρόπους από τον ίδιο παράγοντα, η συνδυασμένη τους χρήση θα οδηγούσε στην εξουδετέρωση της επίδρασής του, βελτιώνοντας την εύστοχη εκτίμηση της αντοχής. Για παράδειγμα, η αύξηση της υγρασίας αυξάνει την παλμική ταχύτητα μειώνει όμως το συντελεστή αναπήδησης.

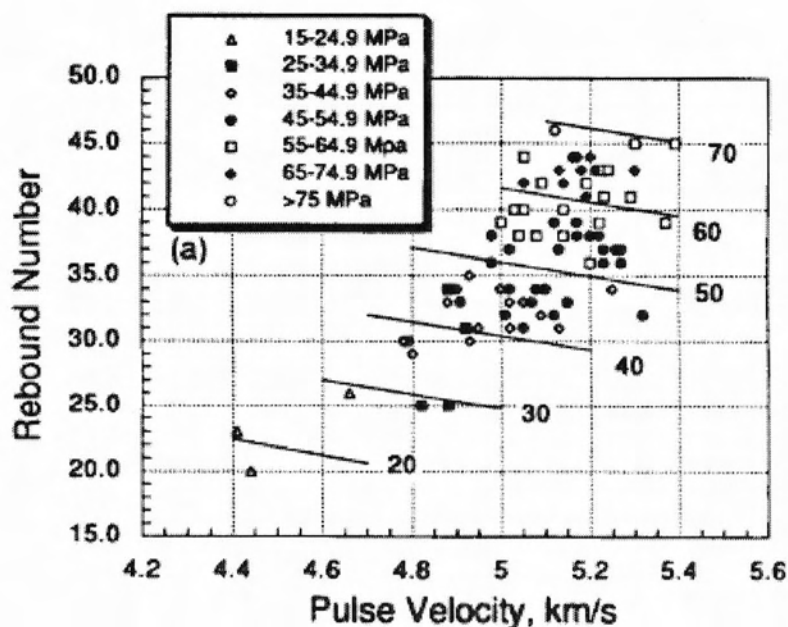
Ανάμεσα σε όλες τις προτάσεις, ο συνδυασμός παλμικής ταχύτητας και συντελεστή αναπήδησης τράβηξε τα περισσότερα βλέμματα. Αυτή η συνδυαστική μέθοδος υποστηρίχθηκε έντονα από τον Δρ. I. Facaoaru του Building Research Institute στη Ρουμανία και είναι γνωστή ως μέθοδος SONREB [59]. Η μέθοδος SONREB

βασίζεται στο συσχετισμό που προκύπτει από ένα καθορισμένο μείγμα σκυροδέματος. Χρησιμοποιώντας μεθόδους πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, η θλιπτική αντοχή f_{ck} συγκεκριμένων δοκιμίων, εκφράζεται σε συνάρτηση του μέσου συντελεστή αναπήδησης R και της μέσης παλμικής ταχύτητας V . Μια ποικιλία από εξισώσεις συσχέτισης προτάθηκαν από διάφορους ερευνητές [60]. Για παράδειγμα, κάποιιοι χρησιμοποίησαν την ακόλουθη γραμμική εξίσωση:

$$S = A_0 + A_1 * R + A_2 * V$$

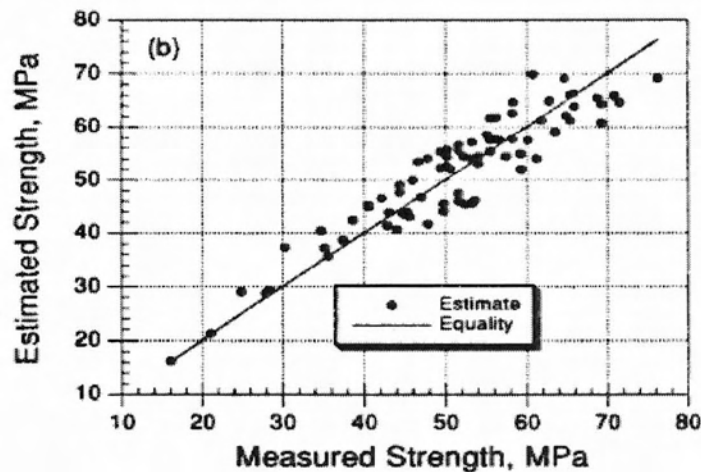
Οι συντελεστές A_0, A_1, A_2 καθορίζονται από τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Αυτή η σχέση μπορεί να απεικονιστεί σε ένα δυσδιάστατο γράφημα από μια σειρά ισοϋψών καμπύλων που αντιπροσωπεύουν τους συνδυασμούς τιμής αναπήδησης και παλμικής ταχύτητας που δίνουν την ίδια εκτιμώμενη αντοχή.

Αναφερόμενες τιμές του συντελεστή αναπήδησης, της παλμικής ταχύτητας και της θλιπτικής αντοχής [61] χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν τη φύση της συσχέτισης SONREB. Τα δημοσιευμένα στοιχεία τοποθετήθηκαν σε ένα υπολογιστικό φύλλο και η παραπάνω εξίσωση εφαρμόστηκε για τα στοιχεία. Με βάση στην γραμμική παλινδρόμηση, προέκυψαν ισοϋψείς καμπύλες για θλιπτικές αντοχές 20, 30, 40, 50, 60 και 70 MPa, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.22:



Σχήμα 3.22: Θλιπτική αντοχή συναρτήσει αναπήδησης και ταχύτητας υπερήχων [61].

Τα στοιχεία χωρίστηκαν σε ομάδες σύμφωνα με την μετρούμενη θλιπτική τους αντοχή. Η διασπορά των στοιχείων σχετικά με την καλύτερη αντιστοιχία φαίνεται στο Σχήμα 3.23:



Σχήμα 3.23: Διαφορές ανάμεσα σε εκτιμώμενη και πραγματική αντοχή.

Γενικά οι διαφορές ανάμεσα σε εκτιμώμενη και πραγματική αντοχή του σκυροδέματος κυμαίνονται στο 15%.

Στη μέθοδο SONREB [59], ο συσχετισμός βασίζεται σε συγκεκριμένο μείγμα σκυροδέματος. Για να βελτιωθεί η εγκυρότητα της εκτιμώμενης αντοχής για άλλα μείγματα, εφαρμόζονται μια σειρά από συντελεστές επιρροής στην εκτιμώμενη αντοχή που προκύπτει από ένα συγκεκριμένο μείγμα. Πέντε συντελεστές χρησιμοποιούνται για τον τύπο τσιμέντου, την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, το είδος των αδρανών, τη κοκκομετρική τους διαβάθμιση και το μέγιστο μέγεθος αδρανούς. Έτσι, με γνώση για το κάθε σκυρόδεμα βελτιώνουμε την ακρίβεια της εκτιμώμενης αντοχής. Εάν τα στοιχεία του μίγματος δεν είναι διαθέσιμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πυρήνες για να πάρουμε έναν διορθωτικό παράγοντα, ο οποίος ισούται με το λόγο της μετρούμενης αντοχής του πυρήνα προς την εκτιμώμενη αντοχή του από μια συγκεκριμένη συσχέτιση.

Από την εμπειρία που αποκόμισε από την Ρουμανία, ο Facsoaru [59] πρότεινε τα επόμενα επίπεδα ακρίβειας για την μέθοδο SONREB:

- Όταν είναι γνωστή η σύνθεση και έχουμε και διαθέσιμους πυρήνες, η ακρίβεια είναι στο 10 – 15%.
- Όταν μόνο η σύσταση είναι γνωστή, η ακρίβεια είναι στο 15 – 20%.
- Όταν δεν είναι γνωστή η σύνθεση και δε διαθέτουμε και πυρήνες, η ακρίβεια είναι στο 20 – 30%.

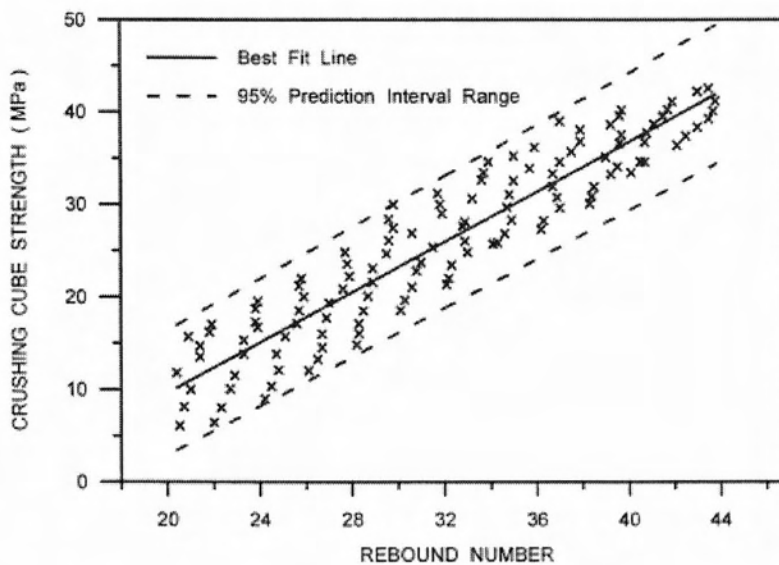
Η μέθοδος SONREB μελετήθηκε και σε άλλες χώρες κατά τη δεκαετία του 70 [60]. Στη Βόρεια Αμερική, η μέθοδος προκάλεσε ελάχιστο ενδιαφέρον. Εξαιτίας της απόκλισης των υλικών σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές στη Βόρεια Αμερική, ένα μεγάλο πρόγραμμα θα χρειαζόταν για να καθοριστούν συγκεκριμένες συσχετίσεις και οι αντίστοιχοι συντελεστές τους. Ενδιαφέρον και χρηματοδότηση για τέτοιο πρόγραμμα δεν υπήρχε. Η μέθοδος γενικά, ταιριάζει καλύτερα για ποιοτικό έλεγχο σε εργοστάσιο προκατασκευασμένων, όπου χρησιμοποιούνται παρόμοια υλικά.

3.3.2. Σχέση $R - V - f_{ck}$

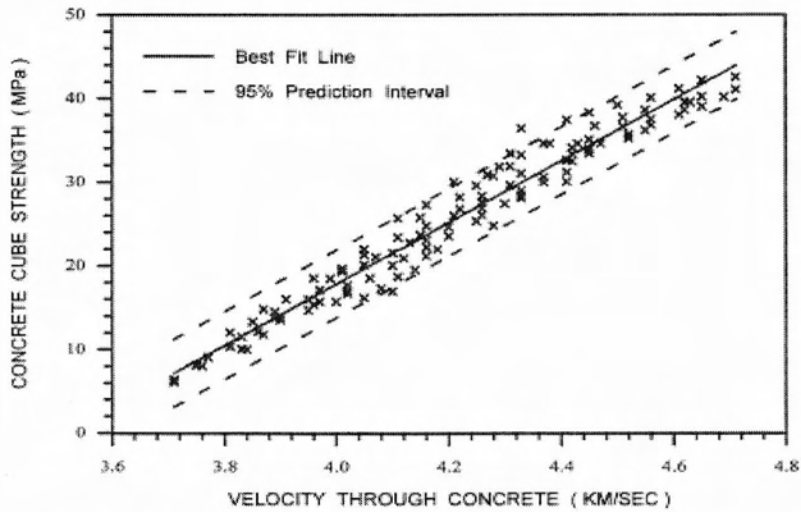
Σκοπός της έρευνας ήταν να προκύψει μια απλή σχέση ανάμεσα στη τιμή αναπήδησης, την παλμική ταχύτητα και τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Το διάγραμμα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερο έτσι ώστε να χρησιμοποιείται από μηχανικούς που εργάζονται επί τόπου. Επίσης, το διάγραμμα χρησιμοποιήθηκε αργότερα για την εκτίμηση της αντοχής σε μερικά δείγματα από σκυρόδεμα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τα πειράματα αποτελούνταν από τα ακόλουθα βήματα:

1. Διάφορα μίγματα σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν για την προετοιμασία συγκεκριμένων κυβικών δοκιμών 15x15 cm.
2. Κυβικά δοκίμια από σκυροδέματα αγνώστους ιστορίας επίσης χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις.
3. Όλα τα δοκίμια είχαν βυθιστεί στο νερό για ελάχιστη περίοδο 24 ωρών πριν τον έλεγχο.
4. Λίγο πριν από τη δοκιμή, οι κύβοι τρίβονται με ένα καθαρό στεγνό πανί για να επιτευχθεί μια κορεσμένη επιφάνεια ξηρού δείγματος.

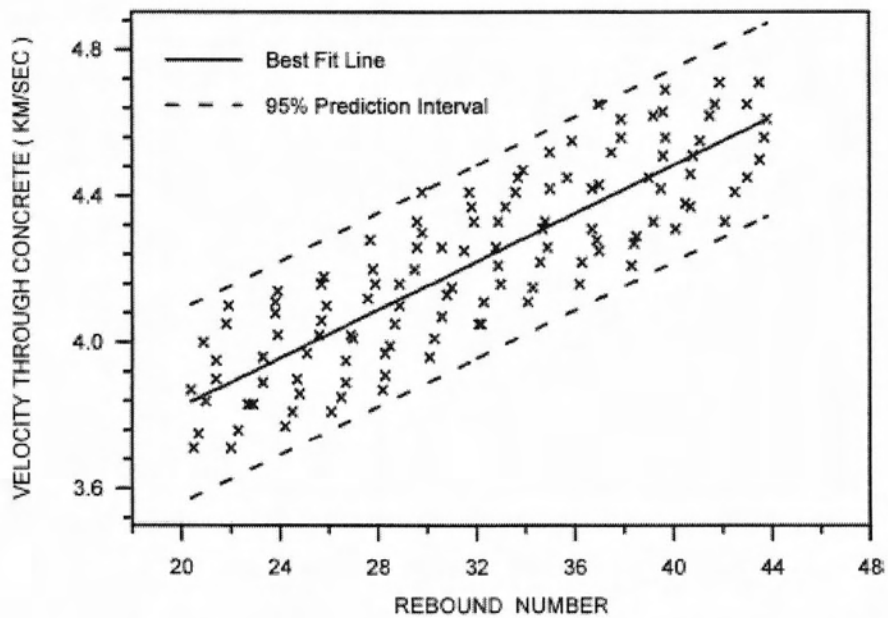
5. Όταν ολοκληρώθηκε το στέγνωμα, κάθε μια από τις δύο απέναντι επιφάνειες του κύβου προετοιμάστηκε για τον έλεγχο αναπήδησης, σύμφωνα με τις προδιαγραφές.
6. Οι κύβοι τοποθετήθηκαν σε μια μηχανή θλίψης και τους εφαρμόστηκε ένα μικρό φορτίο. Η τιμή αναπήδησης προέκυψε από τρεις οριζόντιες μετρήσεις σε κάθε μια από τις τέσσερις επιφάνειες του κύβου. Τα αποτελέσματα της τιμής αναπήδησης εκτιμήθηκαν σύμφωνα με τους κανόνες του ASTM C 805 [62].
7. Όταν ολοκληρώθηκε ο έλεγχος αναπήδησης, κάθε μια από τις δύο επιφάνειες προετοιμάστηκε για τον έλεγχο του υπερήχου, σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Φροντίστηκε να μη ληφθούν υπόψη εγχοπές που προέκυψαν από το κρουσίμετρο. Ο χρόνος διάδοσης μετρήθηκε σε κάθε δυο απέναντι επιφάνειες και καταγράφηκε ο μέσος όρος.
8. Όταν ολοκληρώθηκαν οι μη-καταστροφικοί έλεγχοι, τα δοκίμια φορτίστηκαν μέχρι την αστοχία και καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο.
9. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.24-3.27:



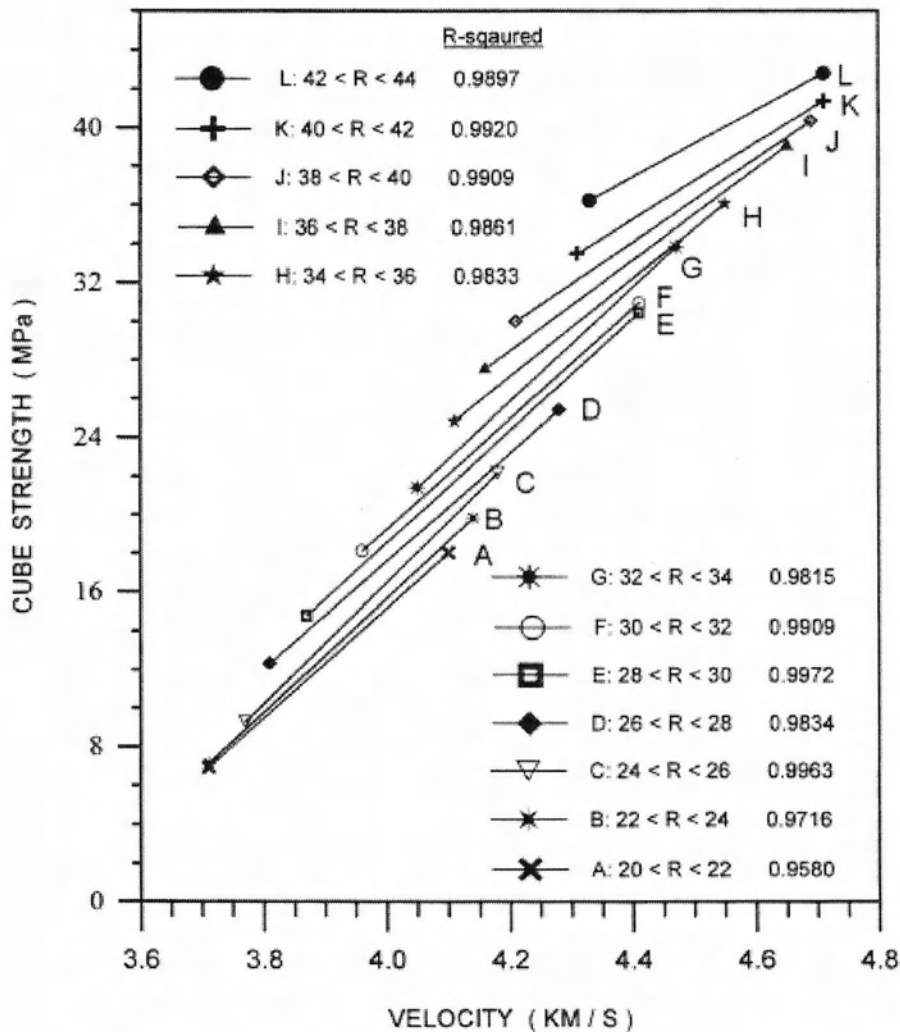
Σχήμα 3.24: Σχέση αναπήδησης – θλιπτικής αντοχής [63].



Σχήμα 3.25: Σχέση ταχύτητας υπερήχων – θλιπτικής αντοχής [63].

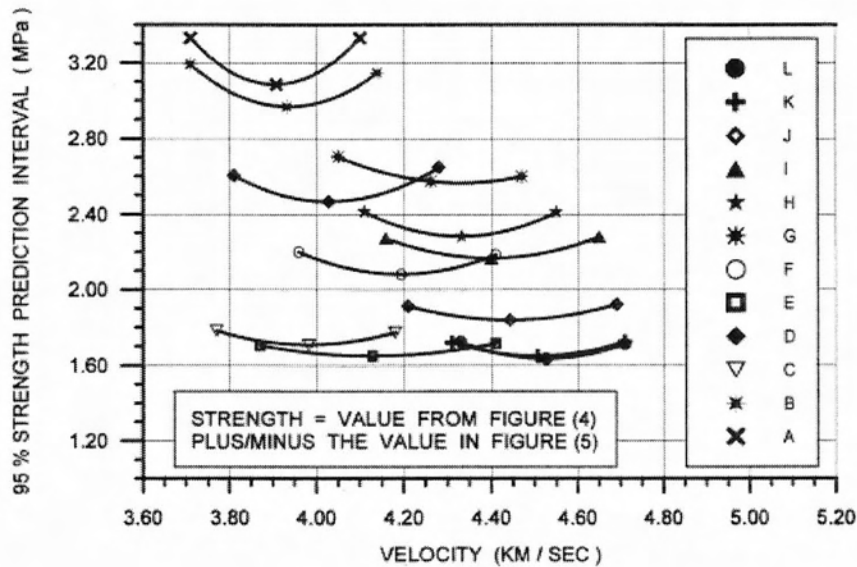


Σχήμα 3.26: Σχέση αναπήδησης – ταχύτητας υπερήχων [63].



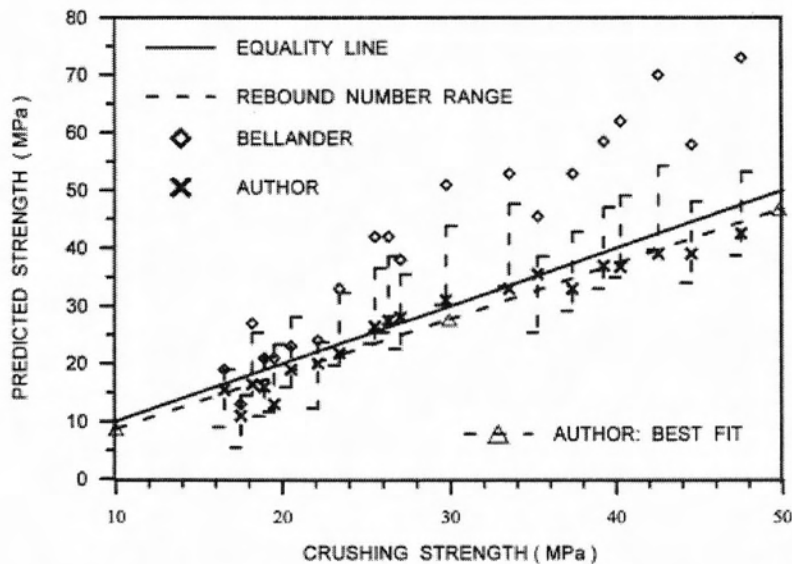
Σχήμα 3.27: Σχέση ταχύτητας υπερήχων – θλιπτικής αντοχής για διάφορες τιμές αναπήδησης [63].

10. Καινούρια δείγματα προέκυψαν (είτε στο εργαστήριο είτε απευθείας από κατασκευές) και ελέγχθηκαν με τον ίδιο τρόπο, ώστε να ελεγχθούν και τα αποτελέσματα από τα διαγράμματα. Αυτά τα αποτελέσματα προστέθηκαν στα προηγούμενα μέχρι να προκύψουν αξιόπιστα. Σε κάθε περίπτωση, εφαρμόστηκε στατιστική ανάλυση [64] και το 95% διάστημα πρόβλεψης σχεδιάστηκε με βάση την πιο ταιριαστή γραμμή. Τα 95% διαστήματα πρόβλεψης για τις τιμές του Σχήματος 3.27, μεταφέρθηκαν στο παρακάτω διάγραμμα με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχει σύγχυση των καλύτερα εφαρμοζόμενων γραμμών.



Σχήμα 3.28: Διόρθωση εκτιμώμενης αντοχής [63].

11. Είκοσι δείγματα πάρθηκαν από κατασκευές και εκτιμήθηκε η αντοχή τους με σύμφωνα με το σχήμα 3.27. Τα αποτελέσματα, τα οποία συγκρίθηκαν και με άλλα αποτελέσματα, φαίνονται στο σχήμα 3.29.



Σχήμα 3.29: Διαφορές εκτιμώμενης – πραγματικής θλιπτικής αντοχής [63].

Όλα τα δοκίμια παρασκευάστηκαν από τοπικά υλικά, τα οποία αποτελούνταν από:

- Συνηθισμένα, τσιμέντα Portland, ποζολανικά ή θευικά αντιστεκόμενα.
- Αδρανή από τοπικές φυσικές πηγές ή θρυμματισμένος ασβεστόλιθος.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 3.24 – 3.29. Το Σχήμα 3.24 δίνει τη σχέση μεταξύ τιμής αναπήδησης και θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος. Η καλύτερη ευθεία που αντιπροσωπεύει αυτή τη σχέση είναι:

$$S = 1.353RN - 17.393 \quad [63],$$

όπου S είναι η αντοχή (MPa) και RN η τιμή αναπήδησης με συντελεστή $r^2=0,88$.

Το 95% διάστημα πρόβλεψης επίσης φαίνεται και είναι σαφές ότι είναι αρκετά μεγάλο.

Το Σχήμα 3.25 δίνει την σχέση ανάμεσα σε παλμική ταχύτητα και θλιπτική αντοχή σκυροδέματος. Η καλύτερη ευθεία που αντιπροσωπεύει αυτή τη σχέση είναι:

$$S = 36.72USPV - 129.077 \quad [63],$$

όπου $USPV$ είναι η παλμική ταχύτητα (km/s), με συντελεστή $r^2=0,9562$.

Η σχέση αυτή δίνει καλύτερη συσχέτιση συγκριτικά με την πρώτη και το 95% διάστημα πρόβλεψης είναι στενότερο. Οι αποκλίσεις δεν ήταν μεγάλες και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δοκίμια είχαν όλα κορεσμένη στεγνή επιφάνεια όταν εξετάστηκαν και υπήρχαν μικρές αποκλίσεις στο τύπο των αδρανών.

Το Σχήμα 3.26 δείχνει τη σχέση ανάμεσα στη μετρούμενη παλμική ταχύτητα και στην τιμή αναπήδησης των δοκιμίων. Η καλύτερη σχέση που προκύπτει είναι:

$$USPV = 0.0329RN + 3.166 \quad [63],$$

Όπου ο συντελεστής $r^2=0,7358$. Είναι προφανές ότι το 95% διάστημα πρόβλεψης είναι αρκετά μεγάλο, κάτι το οποίο σημαίνει ότι δεν μπορεί να προκύψει ακριβής σχέση ανάμεσα σε αυτές τις δύο μεταβλητές. Το μόνο συμπέρασμα είναι ότι υπάρχει μια γενική τάση της ταχύτητας να αυξηθεί με την αύξηση της τιμής αναπήδησης.

Το Σχήμα 3.27 δείχνει τη σχέση ανάμεσα στη παλμική ταχύτητα και τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος για διάφορες τιμές αναπήδησης. Στο σχήμα αυτό, η τιμή αναπήδησης οργανώθηκε σε ομάδες, αυξανόμενες ανά δύο. Σχέσεις ευθειών γραμμών προέκυψαν όπως φαίνεται και στο σχήμα. Ο συντελεστής r^2 για όλες τις ευθείες ήταν μεγαλύτερος του 0,95. Ωστόσο, το r^2 από μόνο του δεν είναι επαρκής ένδειξη για την

επάρκεια των διαγραμμάτων [65]. Γι'αυτό, το 95% διάστημα πρόβλεψης υπολογίστηκε για όλες τις γραμμές και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3.28. Η χρήση αυτού του διαγράμματος λαμβάνει υπόψη τις αποκλίσεις στα αποτελέσματα από δύο δοκιμές. Μια πολύ καλύτερη συσχέτιση γίνεται όταν χρησιμοποιείται συνδυασμένη μέθοδος συγκριτικά με τις μοναχικές. Είναι ξεκάθαρο ότι το φάσμα είναι πολύ μικρό και ως εκ τούτου, η προβλεπόμενη δύναμη από το Σχήμα 3.27 μπορεί να ήταν λανθασμένη.

Για παράδειγμα, εάν η ταχύτητα είναι 4,2 km/s και η τιμή αναπήδησης μεταξύ 28 και 30, η γραμμή E στο Σχήμα 3.27 πρέπει να επιλεγθεί. Από το Σχήμα 3.27, η θλιπτική αντοχή που προκύπτει είναι 24 MPa. Επίσης, χρησιμοποιώντας το σχήμα 3.28, η αυξομείωση θα είναι $\pm 1,65$ MPa. Ως εκ τούτου, η εκτιμώμενη αντοχή είναι $24 \pm 1,65$ MPa.

Η εφαρμογή της μεθόδου σε 20 δοκίμια από υφιστάμενες κατασκευές παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.29, στο οποίο επίσης φαίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας τα εξής:

- Το διάγραμμα που διαθέτει ήδη το κρουσίμετρο
- Το διάγραμμα που προτείνει ο Bellander [66]
- Το διάγραμμα που προκύπτει στο Σχήμα 3.27
- Τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το BS 1881: Part 120 [67]. Είναι ξεκάθαρο από το σχήμα ότι οι προβλεπόμενες τιμές είναι κοντά στις πραγματικές, που προκύπτουν από τη θλίψη του δοκιμίου. 18 αποτελέσματα (90% του συνόλου) βρίσκονται μεταξύ +4,56% και - 15,34%. Από την άλλη, δύο τιμές (10% του συνόλου), έδειξαν περισσότερο από 30% απόκλιση. Και οι δύο δοκιμές είχαν χαμηλή αντοχή (κάτω από 20 MPa). Όταν σχεδιάζονταν οι 95% προβλεπόμενες τιμές, παρατηρήθηκε ότι η ισοδύναμη γραμμή περνούσε μόνο από το 60% των τιμών. Ωστόσο, αυτό μπορεί να αποδοθεί στο στενό εύρος πρόβλεψης. Η απόκλιση μεταξύ πραγματικών αποτελεσμάτων και εκτιμώμενων οφείλεται στο γεγονός ότι τα δοκίμια από υφιστάμενες κατασκευές είναι πυρήνες και η θλιπτική αντοχή των κύβων προέκυψε χρησιμοποιώντας διάφορες διορθώσεις που εισήχθησαν στις προδιαγραφές. Επίσης, οι μετρήσεις δεν ήταν εύστοχες και αντιπροσωπευτικές όταν συγκρίθηκαν με

τα αποτελέσματα που δίνει το Σχήμα 3.27. Από το Σχήμα 3.29 είναι επίσης σαφές ότι όλα τα αποτελέσματα που κυμάνθηκαν, παρέχονται από το κρουσίμετρο. Αυτή η διακύμανση είναι μεγάλη και δε γίνεται να γίνει άμεση εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος. Για παράδειγμα, μια τιμή αναπήδησης 31,5 δίνει αντοχή από 19,7 – 32,3MPa, το οποίο αποτελεί μεγάλου εύρους πρόβλεψη. Οι τιμές Bellander είναι επίσης μακριά από τις πραγματικές. Τα αποτελέσματα του πειράματος είναι πολύ κοντά στην πραγματική τιμή, συνήθως λίγο μικρότερα κάτι το οποίο είναι υπέρ της ασφαλείας. Υπέρ της ασφαλείας είναι και το Σχήμα 3.27 όμως, το περιθώριο ασφαλείας είναι απρόβλεπτο.

Τα συμπεράσματα αυτού του πειράματος λοιπόν είναι τα εξής:

- Η αποκλειστική χρήση του κρουσίμετρου δεν είναι κατάλληλη για την εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος. Υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις, κάτι το οποίο δυσκολεύει τη κρίση του μηχανικού.
- Ο υπέρηχος φαίνεται να δίνει καλύτερα αποτελέσματα από το κρουσίμετρο αλλά και πάλι δεν δίνει τα επιθυμητά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται μόνος του.
- Ο συνδυασμός των μεθόδων δίνει πολύ κοντινά στη πραγματικότητα αποτελέσματα. Το 95% διάστημα πρόβλεψης είναι στενό και ενθαρρύνει την κρίση του μηχανικού.
- Η χαμηλές αντοχές του σκυροδέματος έδειξαν μεγαλύτερα διαστήματα πρόβλεψης και ως εκ τούτου, χειρότερη πρόβλεψη της αντοχής από τη συνδυαστική μέθοδο.
- Καλύτερα αποτελέσματα δίνουν σκυροδέματα των οποίων η αντοχή ξεπερνά τα 20 MPa.
- Η μέθοδος μπορεί να επεκταθεί σε ελέγχους υφιστάμενων κατασκευών, με τη λήψη άμεσων μετρήσεων σε στοιχεία σκυροδέματος.

3.3.3. Στατιστική Ανάλυση Σχέσεων $R - V - f_{ck}$

Εδώ θα προσπαθήσουμε να εκτιμήσουμε πιθανοτικά την αντοχή του σκυροδέματος σε μια υπάρχουσα κατασκευή. Υποθέτοντας κανονική κατανομή, οι παράγοντες που μας ενδιαφέρουν είναι η μέση τιμή της αντοχής μ και η τυπική απόκλιση σ . Οι παράμετροι αυτοί θα υπολογιστούν από ένα πεπερασμένο αριθμό μετρήσεων, έμμεσων ή άμεσων. Άμεσα αποτελέσματα θα πάρουμε μέσω κάποιων καταστροφικών μετρήσεων και έμμεσα από μη-καταστροφικές μετρήσεις. Μια ορθολογική διαδικασία συνδυασμού των άμεσων και των έμμεσων δεδομένων παρουσιάζεται από τα στατιστικά του Bayes [68] [69], η χρήση των οποίων έχει προταθεί για πολλές εφαρμογές, όπως στον υπολογισμό διορθωτικών συντελεστών στον σχεδιασμό [70], στην πρόβλεψη της συρρίκνωσης και του ερπυσμού [71], στην πρόβλεψη του ιδανικού αριθμού δοκιμίων που θα χρειαστούν για την σωστή εκτίμηση της αντοχής [72] και τέλος για τον σωστό σχεδιασμό των θεμελίων [73].

Κατ' αρχήν να τονίσουμε ότι προγενέστερη πληροφορία εννοούμε οτιδήποτε γνωρίζουμε και μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε από παλιά πειράματα, παρόμοιες κατασκευές κλπ. Θεωρούμε λοιπόν ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι κανονική (Gaussian) σε ένα ομογενές υλικό.

$$f(x) = (2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (1)$$

όπου

x η αντοχή (τυχαία τιμή)

σ^2 η διακύμανση

μ η μέση ή προσδοκώμενη μέση τιμή της αντοχής

Χρησιμοποιώντας τη θεωρία του Bayes, θα πρέπει να πάρουμε μια τυχαία τιμή της αντοχής και χρησιμοποιώντας προγενέστερη πληροφορία θεωρούμε την συνάρτηση πιθανότητας της μέσης τιμής από τον παρακάτω τύπο

$$f(\mu) = \left(2\pi\sigma_{pr}^2\right)^{-n/2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\mu - \mu_{pr}}{\sigma_{pr}}\right)^2\right] \quad (2)$$

όπου

μ η μέση τιμή της αντοχής

σ_{pr}^2 η διακύμανση του μ σύμφωνα με προγενέστερη πληροφορία

μ_{pr} η μέση τιμή του μ σύμφωνα με προγενέστερη πληροφορία

Έστω διαθέτουμε n αριθμό δοκιμίων με αντοχές X_1, X_2, \dots, X_n αντίστοιχα. Μπορούμε να συνδυάσουμε τα δεδομένα αυτά με προγενέστερη πληροφορία όσον αφορά τη μέση τιμή και να πάρουμε νέα δεδομένα για την αντοχή.

$$f(\mu|x_1, \dots, x_n) = \frac{\prod_{i=1}^n f(x_i|\mu) f(\mu)}{\int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^n f(x_i|\mu) f(\mu) d\mu} \quad (3)$$

όπου

$$f(x_i|\mu) = (2\pi\sigma_0^2)^{-1/2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma_0}\right)^2\right]$$

και

$$\prod_{i=1}^n f(x_i|\mu) = \left[(2\pi\sigma_0^2)^{-1/2}\right]^n \exp\left[-\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma_0^2}\right] = \text{Συνάρτηση πιθανότητας}$$

όπου σ_0^2 η υποτιθέμενη διακύμανση της αντοχής

Μπορεί να αποδειχθεί ότι η εξίσωση που περιγράφει τα νέα δεδομένα ακολουθεί την καμπύλη του GAUSS με μέση τιμή και τυπική απόκλιση να δίνεται από τους τύπους

$$\mu_{po} = \frac{\left(\frac{n}{\sigma_o^2}\right) \bar{X} + \frac{1}{\sigma_{pr}^2} \mu_{pr}}{\left(\frac{n}{\sigma_o^2} + \frac{1}{\sigma_{pr}^2}\right)} \quad (4)$$

$$\sigma_{po}^2 = \frac{\sigma_o^2 \sigma_{pr}^2}{n\sigma_{pr}^2 + \sigma_o^2} \quad (5)$$

Ακολουθώντας τη μέθοδο που προτείνεται από τον Tang [73], τα άμεσα αποτελέσματα που παίρνουμε από τις μετρήσεις δοκιμίων, με τα έμμεσα που παίρνουμε από τον υπολογισμό των ταχυτήτων των κυμάτων συνδέονται με την προγενέστερη πληροφορία σε 2 βήματα. Αρχικά οι ταχύτητες συνδέονται με οποιαδήποτε προγενέστερη χρήσιμη πληροφορία για να έχουμε μια πρώτη νέα εκτίμηση της αντοχής. Αυτή τη νέα πληροφορία που εξάγαμε θα την χρησιμοποιήσουμε ως προγενέστερη στο συνδυασμό της με τις μετρήσεις των δοκιμίων, ώστε να εξάγουμε μια μεταγενέστερη πληροφορία. Τα διάφορα σφάλματα που πιθανόν να έγιναν στην έμμεση μέθοδο θα ενσωματωθούν τώρα στη διαδικασία.

Το 1^ο βήμα περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

$$E(x|\mu) = \alpha v^\beta \quad (6)$$

όπου

x η αντοχή

v η ταχύτητα του κύματος

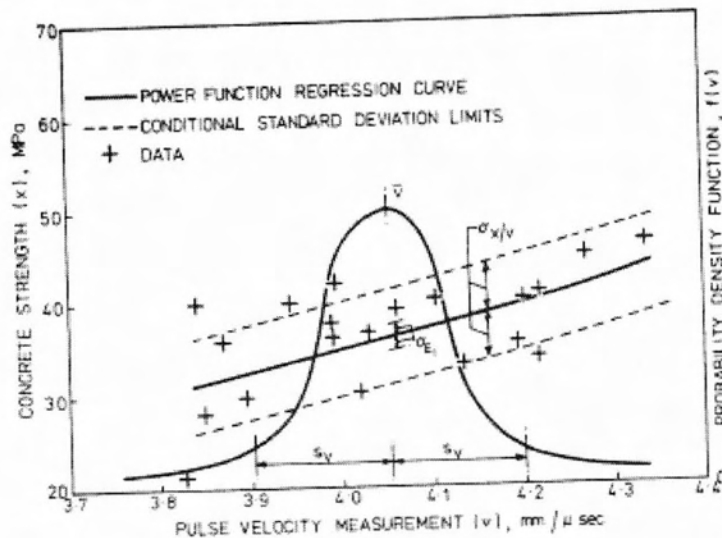
α,β σταθερές

Το σφάλμα κατά τη βαθμονόμηση θεωρείται σταθερό και δίνεται από τον τύπο

$$(\sigma_{x|v})^2 = \frac{1}{(m-2)} \sum_{i=1}^m [x_i - E(x_i|v_i)]^2 \quad (7)$$

όπου ο αριθμός των μετρήσεων που έγιναν για τη διαμόρφωση της σχέσης.

Στο Σχήμα 3.30 βλέπουμε γραφικά τη σχέση των ταχυτήτων με τις θλιπτικές αντοχές. Η διασπορά των τιμών των ταχυτήτων γίνεται εμφανής μέσω της μέσης τιμής και της διακύμανσης σ^2 .



Σχήμα 3.30: Σχέση ταχύτητας υπερήχων – θλιπτικών αντοχών/

Πριν αναπτύξουμε τη συνάρτηση πιθανότητας θα υπολογίσουμε τη διακύμανση της μέσης τιμής της αντοχής δίνοντας βάση στον τύπο του Tang

$$(\sigma_E)^2 = \frac{(\sigma_{x|v})^2}{m} \left[1 + \left(\frac{v_i - \bar{v}}{S_v} \right)^2 \right] \quad (8)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία της συνολικής πιθανότητας υπολογίζουμε την πραγματική αντοχή του σκυροδέματος από τον παρακάτω τύπο

$$f(x) = \int_a^{\infty} f(x_i|E_i) f(E_i) dE_i \quad (9)$$

όπου παρατηρούμε ότι $E(x)$ που υπολογίσαμε συνδυάζοντας προγενέστερες πληροφορίες με τις ταχύτητες των κυμάτων, χρησιμοποιείται εδώ ως προγενέστερη γνώση για να υπολογίσουμε την τελική αντοχή. Επιπλέον αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση αυτή ακολουθεί την κατανομή Gauss θεωρώντας ως μέση τιμή και διακύμανση από τους παρακάτω τύπους

$$\text{Mean} = E(x|v) \quad (10)$$

$$\text{Variance} = (\sigma_{v|v})^2 + (\sigma_E)^2 \quad (11)$$

Μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε τον όρο $f(E_i)$ γνωρίζοντας τις ταχύτητες και θεωρώντας την μέση τιμή της αντοχής ως προγενέστερη γνώση σύμφωνα και πάλι με τη θεωρία συνολικής πιθανότητας

$$f[E(x_i|v_i) | \mu] = \int_{-\infty}^{\infty} f\{[E(x_i|v_i) | \mu] | x_i\} f(x_i) dx_i \quad (12)$$

η οποία μπορεί να θεωρηθεί επίσης ότι ακολουθεί την κατανομή του Gauss με μέση τιμή και τυπική απόκλιση που δίνονται ως εξής

$$\text{Mean} = E(x|v)$$

$$\text{Variance} = (\sigma_{x|v})^2 + (\sigma_{Ei})^2 + (\sigma_v)^2 = (\sigma_{Si})^2 \quad (14)$$

Πιο συγκεκριμένα τώρα, αν δίνονται r τιμές ταχυτήτων των κυμάτων ο τύπος γίνεται

$$\prod_{i=1}^r f[E(x_i|v_i) | \mu] = \prod_{i=1}^r \frac{(2\pi)^{-r/2}}{(\sigma_{Si})^2} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{[E(x_i|v_i) - \mu]^2}{(\sigma_{Si})^2}\right\} \quad (15)$$

Τελικά η συνάρτηση που μας δίνει την μέση τιμή της αντοχής του σκυροδέματος γνωρίζοντας τις ταχύτητες είναι η παρακάτω

$$f[\mu|E(x_i|v_i)] = \frac{\prod_{i=1}^r f[E(x_i|v_i) | \mu] f(\mu)}{\int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^r f[E(x_i|v_i) | \mu] f(\mu) d\mu} \quad (16)$$

η οποία ακολουθεί την κατανομή Gauss θεωρώντας τυπική απόκλιση και διακύμανση από τους τύπους

$$\mu_{pu} = \frac{\left[\mu_{pr} / \sum_{i=1}^r \left(\frac{1}{\sigma_{Si}^2} \right) \right] + \left[\sigma_{pr}^2 \sum_{i=1}^r \frac{E(x_i|v_i)}{\sigma_{Si}^2} / \sum_{i=1}^r \left(\frac{1}{\sigma_{Si}^2} \right) \right]}{\left[1 / \sum_{i=1}^r \left(\frac{1}{\sigma_{Si}^2} \right) \right] + \sigma_{pr}^2} \quad (17)$$

$$\sigma_{pu}^2 = \frac{\sigma_{pr}^2 / \sum_{i=1}^r \left(\frac{1}{\sigma_{Si}^2} \right)}{\sigma_{pr}^2 + 1 / \sum_{i=1}^r \left(\frac{1}{\sigma_{Si}^2} \right)} \quad (18)$$

Οι τύποι αυτοί τώρα θα χρησιμοποιηθούν ως προγενέστερη πληροφορία στους τύπους (4) και (5) ώστε να λάβουμε υπόψη και τις άμεσες μετρήσεις των δοκιμών.

Το να συνδυάσουμε μετρήσεις δοκιμών καταστροφικά με 2 έμμεσες μετρήσεις και οποιαδήποτε χρήσιμη προγενέστερη πληροφορία αποτελεί διαδικασία 3 βημάτων. Αρχικά συνδυάζουμε μία από τις έμμεσες μετρήσεις με την προγενέστερη πληροφορία για να παράγουμε μια νέα πληροφορία χρησιμοποιώντας της εξισώσεις (17) και (18). Τα νέα δεδομένα θα χρησιμοποιηθούν τώρα ως προγενέστερη πληροφορία για τον συνδυασμό της με τη δεύτερη έμμεση μέτρηση και πάλι σύμφωνα με τις εξισώσεις (17) και (18). Τέλος το αποτέλεσμα του 2^{ου} βήματος θα συνδυαστεί με τις άμεσες μετρήσεις των δοκιμών χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4) και (5) για να λάβουμε το τελικό αποτέλεσμα της μέσης τιμής.

4.ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

4.1. Σκυροδέτηση – Δημιουργία Δοκιμίων

Στις 14 Μαΐου 2009 πραγματοποιήθηκε σκυροδέτηση για τη κατασκευή 15 κυβικών δοκιμίων, διαστάσεων 150x150 mm. Η αναλογία του μίγματος που χρησιμοποιήθηκε για 110 kg σκυροδέμα είναι η εξής:

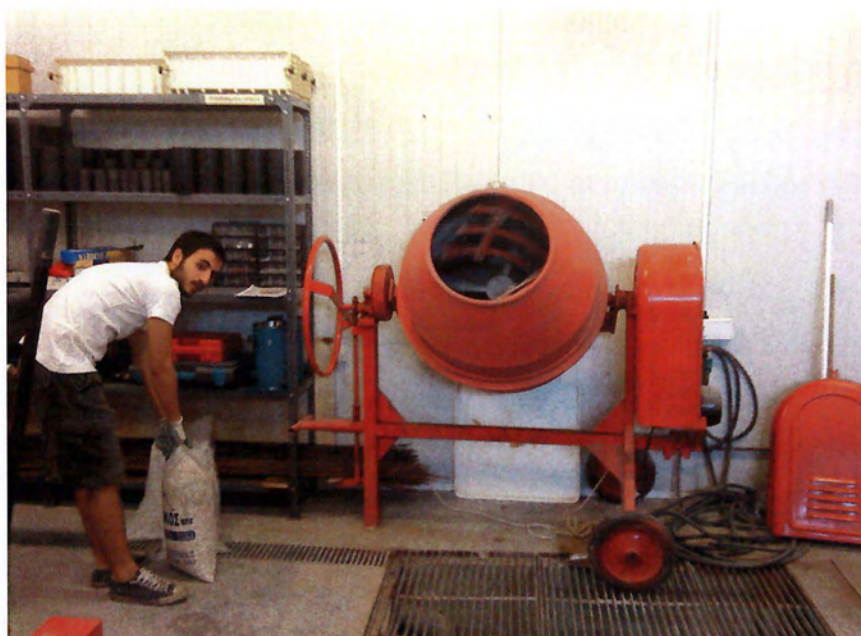
20 kg τσιμέντο (18%)

12 kg νερό (10,9%)

47 kg άμμος (42,7%)

21 kg γαρμπίλι (19%)

10 kg χαλίκι (9%)



Σχήμα 4.1: Προετοιμασία μίγματος σκυροδέματος.

Όταν ολοκληρώθηκε η ανάμειξη του μείγματος σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος κάθισης. Ο κώνος καθίσεως Abrams τοποθετήθηκε πάνω σε επίπεδη, άκαμπτη, οριζόντια, μη απορροφητική επιφάνεια και διαβρέχτηκε εσωτερικά, αυτός και η επιφάνεια έδρασης. Στη συνέχεια γεμίστηκε σε τρεις στρώσεις ίσου ύψους. Κάθε στρώση συμπυκνώθηκε με 25 κτυπήματα της ράβδου συμπυκνώσεως, που κατανεμήθηκαν κατά το δυνατόν ομοιόμορφα στην εκάστοτε στρώση σκυροδέματος. Ο κώνος διατηρήθηκε ακίνητος καθ'

όλη τη διάρκεια του γεμίματος, με τη βοήθεια των δύο περυγίων στήριξης, πάνω στα οποία πατήθηκε. Ύστερα από τη συμπύκνωση και της ανώτερης στρώσης, αφαιρέθηκε το σκυρόδεμα που πλεόναζε και επιπεδώθηκε η άνω επιφάνεια του με παλινδρομική κύλιση της ράβδου συμπύκνωσης στα χείλη του κώνου. Η ανάσυρση του κώνου έγινε ομαλά, με σταθερή ταχύτητα και κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση, χωρίς στροφή και τραντάγματα. Τέλος, υπολογίστηκε η τιμή της κάθισης ίση με 13,5cm, τιμή που είναι ικανοποιητική.



Σχήμα 4.2α: Κώνος Abrams για τη μέτρηση της κάθισης του μίγματος.



Σχήμα 4.2β: Μέτρηση κάθισης μίγματος.

Μετά την πραγματοποίηση του ελέγχου κάθισης, το σκυρόδεμα τοποθετήθηκε στα κυβικά καλούπια, τα τοιχώματα των οποίων είχαν λιπανθεί με λάδι για την εύκολη αποκόλληση του σκυροδέματος μετά την σκλήρυνση. Αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά και πλαστικά καλούπια, χωρίς να προκύπτει κάποια αισθητή διαφορά στο προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής.



Σχήμα 4.3: Μεταλλικά / πλαστικά καλούπια κυβικών δοκιμίων.

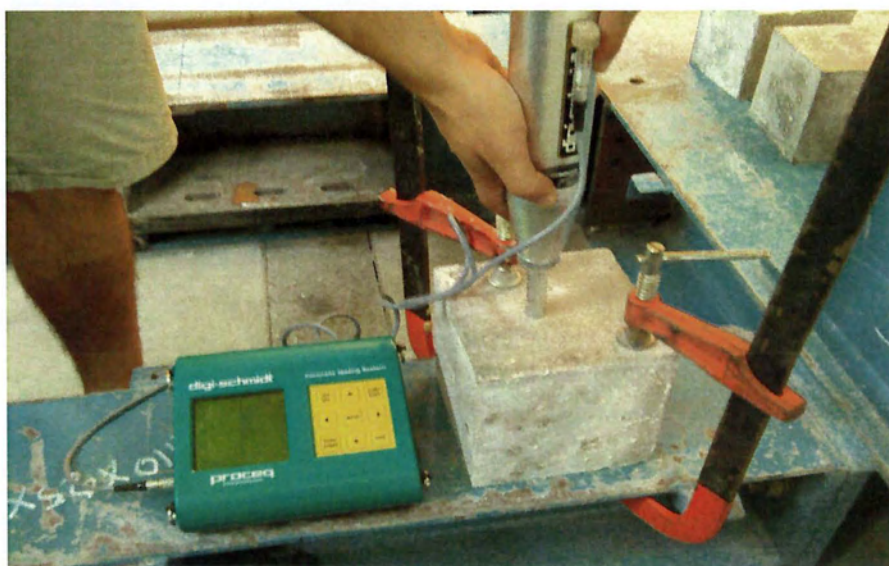
Μετά από μερικές ώρες, τα καλούπια σκεπάστηκαν με μια βρεγμένη λινάτσα και πλαστική μεμβράνη και παρέμειναν εκεί για 4 μέρες σε θερμοκρασία 20 – 23 °C. Μετά από 4 μέρες τα δοκίμια αφαιρέθηκαν προσεκτικά από τα καλούπια και διατηρήθηκαν εμποτισμένα σε νερό για 28 ημέρες.



Σχήμα 4.4: Συντήρηση δοκιμίων σε δεξαμενή νερού σε θερμοκρασία 20 - 23 °C.

4.2. Μη-Καταστροφικός Έλεγχος Δοκιμίων

Οι δοκιμές προγραμματίστηκαν να γίνουν σε 3 χρονικά διαστήματα, σε 28 ημέρες από την μέρα σκυροδέτησης (11 Ιουνίου 2009), σε 7 μήνες (14 Δεκεμβρίου 2009) και σε 1 χρόνο (14 Μαΐου 2010). Για κάθε χρονικό διάστημα χρησιμοποιήθηκαν 5 δοκίμια για τους απαραίτητους ελέγχους. Για τις 28 ημέρες χρησιμοποιήθηκαν τα δοκίμια 09601, 09602, 09603, 09604, 09611, για τους 7 μήνες χρησιμοποιήθηκαν τα 09612, 09613, 09614, 09615, 09616 και για τον 1 χρόνο χρησιμοποιήθηκαν τα 09605, 09606, 09608, 09609, 09610. Κάποιες επιφάνειες λειάνθηκαν με ελαφρόπετρα, για να γίνουν πιο λείες και επίπεδες.



Σχήμα 4.5α: Κατακόρυφη μέτρηση με το κρουσίμετρο αναπήδησης.



Σχήμα 4.5β: Οριζόντια μέτρηση με το κρουσίμετρο αναπήδησης.

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν πάνω σε λεία μεταλλική επιφάνεια και με τη χρήση ειδικής στήριξης μηδενίστηκαν τυχόν πλευρικές μετατοπίσεις που θα επηρέαζαν αρνητικά τα αποτελέσματα. Αρχικά πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος αναπήδησης με τη χρήση του κρουσίμετρου Digi – Schmidt της εταιρίας Proceq, όπως φαίνεται και στα σχήματα 4.5α και 4.5β. Επιλέγονταν οι 3 πιο λείες επιφάνειες του δοκιμίου και πραγματοποιήθηκαν 3 μετρήσεις, μια κατακόρυφη και 2 οριζόντιες. Στην κάθε επιφάνεια έγιναν 5 μετρήσεις κατακόρυφα στην επιφάνεια, αποφεύγοντας τη κρούση στα ίδια σημεία. Το μηχάνημα κατέγραφε αυτόματα το μέσο όρο των μετρήσεων και σε περίπτωση που κάποια μέτρηση είχε αισθητή απόκλιση από το μέσο όρο (10%) την απέρριπτε και λαμβανόταν με νέα. Έτσι, για το κάθε δοκίμιο προέκυψαν 15 τιμές αναπήδησης R από τις οποίες υπολογίστηκε ο αριθμητικός μέσος όρος. Αναλυτικά, όλες οι τιμές αναπήδησης R παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1. Παρακάτω φαίνονται οι μέσοι όροι των 15 τιμών αναπήδησης για το κάθε δοκίμιο:

Τιμές αναπήδησης, R, δοκιμίων 28 ημερών

09601: R = 25,6

09602: R = 23,6

09603: R = 24,9

09604: R = 24,4

09611: R = 22,9

Τιμές αναπήδησης, R, δοκιμίων 7 μηνών

09612: R = 28,2

09613: R = 27,3

09614: R = 28,7

09615: R = 29,3

09616: R = 29,7

Τιμές αναπήδησης, R, δοκιμίων 1 έτους

09605: R = 31,9

09606: R = 33,5

09608: R = 32,2

09609: R = 30,9

09610: R = 31,6



Σχήμα 4.6: Μέτρηση με τη χρήση υπερήχων.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή μέτρησης με τη χρήση υπερήχων. Χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Tico της εταιρίας Proceq με πομπούς συχνότητας 54 kHz. Σε όλα τα δοκίμια επιλέχθηκαν οι πιο λείες επιφάνειες και πραγματοποιήθηκαν 3 μετρήσεις άμεσης διάδοσης: μια στο (1)κέντρο μια στο (2)άνω άκρο και μια στο (3)κάτω. Πριν τη μέτρηση τοποθετείτο ειδική αλοιφή τόσο στους πομπούς όσο και στις επιφάνειες του δοκιμίου σε ‘επαφή’ με τους πομπούς, για βέλτιστη διάδοση του κύματος. Έτσι, για το κάθε δοκίμιο μετρήθηκαν 3 τιμές ταχύτητας από τις οποίες πάρθηκε ο αριθμητικός μέσος όρος. Ο τρόπος μέτρησης φαίνεται και στο σχήμα 4.6. Δυστυχώς, στις 28 ημέρες το μηχάνημα δεν ήταν διαθέσιμο, οπότε οι μετρήσεις των ταχυτήτων πραγματοποιήθηκαν μόνο στους 7 μήνες και στον 1 χρόνο. Αναλυτικά, όλες οι τιμές ταχύτητας παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1. Παρακάτω φαίνονται οι μέσοι όροι των ταχυτήτων, V (m/s) για το κάθε δοκίμιο:

Τιμές ταχυτήτων, V , στα δοκίμια 7 μηνών

09612: $V = 4400$ m/s

09613: $V = 4196$ m/s

09614: $V = 4433$ m/s

09615: $V = 4463$ m/s

09616: $V = 4453$ m/s

Τιμές ταχυτήτων, V , στα δοκίμια 1 έτους09605: $V = 4600$ m/s09606: $V = 4346$ m/s09608: $V = 4446$ m/s09609: $V = 4430$ m/s09610: $V = 4400$ m/s

4.3. Καταστροφικός έλεγχος δοκιμίων



Σχήμα 4.7: Θλιπτική Μηχανή για Καταστροφικό Έλεγχο των δοκιμίων.

Μετά την ολοκλήρωση των μη καταστροφικών μεθόδων ακολούθησε ο καταστροφικός έλεγχος των δοκιμίων, δηλαδή έλεγχος σε μονοαξονική θλιπτική αντοχή. Για αυτή τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε η πρέσα του εργαστηρίου ωπλισμένου σκυροδέματος, DMG με μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο 3000 KN, η οποία φαίνεται και στο σχήμα 4.7. Στόχος ήταν, γνωρίζοντας την αντοχή του κάθε δοκιμίου για το αντίστοιχο διάστημα, να δημιουργηθούν καμπύλες συσχέτισης της αντοχής με την τιμή αναπήδησης, R , και με την παλμική ταχύτητα, V . Οι τιμές της θλιπτικής αντοχής

των κυβικών δοκιμίων παρουσιάζονται στους πίνακες 4.1-4.3, ενώ τα διαγράμματα φορτίου – άξονα μετατόπισης εμβόλου στο Παράρτημα 2.

Τα αποτελέσματά μας φαίνονται συγκεντρωμένα στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 4.1

Δοκίμια 28 ημερών			
Κωδικός δοκιμίου	Rm	Vm (m/s)	f _{ck} (MPa)
09601	25,6	4240	23,46
09602	23,6	3963	22,42
09603	24,9	3980	23,22
09604	24,4	3946	23,58
09611	22,9	3863	21,18
Μέση τιμή	24,3	3998	22,77

Πίνακας 4.2

Δοκίμια 7 μηνών			
Κωδικός δοκιμίου	Rm	Vm (m/s)	f _{ck} (MPa)
09612	28,2	4440	31,00
09613	27,3	4196	33,79
09614	28,7	4420	31,63
09615	29,3	4463	30,21
09616	29,7	4453	31,30
Μέση τιμή	28,9	4444	31,03

Πίνακας 4.3

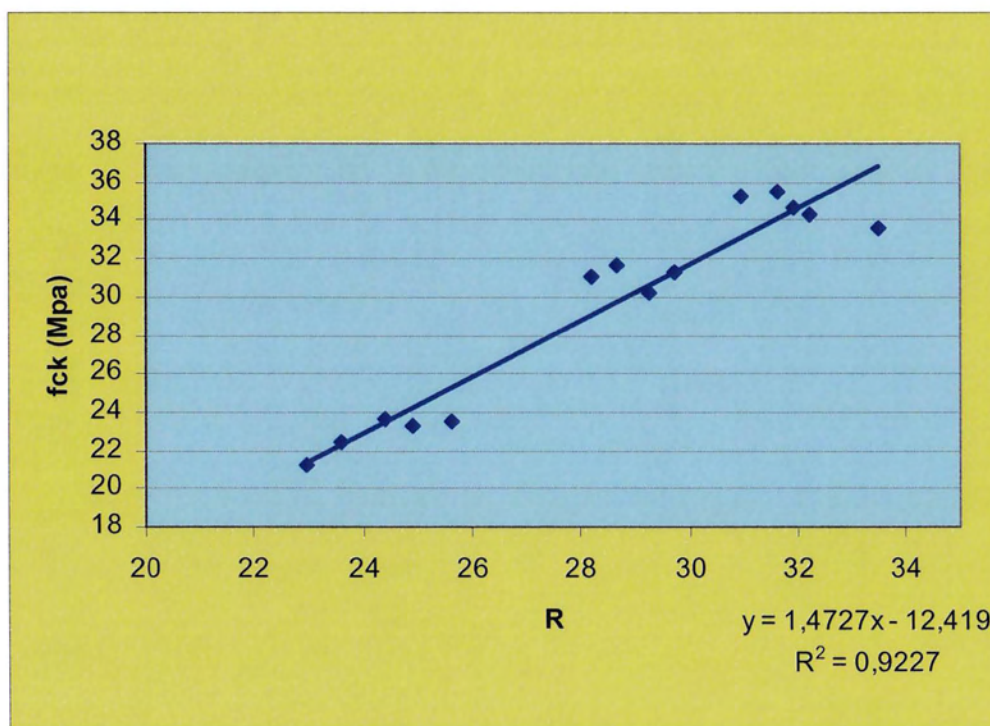
Δοκίμια 1 χρόνου			
Κωδικός δοκιμίου	Rm	Vm (m/s)	f _{ck} (MPa)
09610	31,6	4400	35,52
09609	30,9	4430	35,29
09608	32,2	4446	34,33
09606	33,5	4346	33,61
09605	31,9	4600	34,68
Μέση τιμή	32,1	4444	34,68

Όπου Rm είναι η μέση τιμή των R για το κάθε δοκίμιο, Vm είναι η μέση τιμή των ταχυτήτων για το κάθε δοκίμιο και f_{ck} η θλιπτική αντοχή του δοκιμίου.

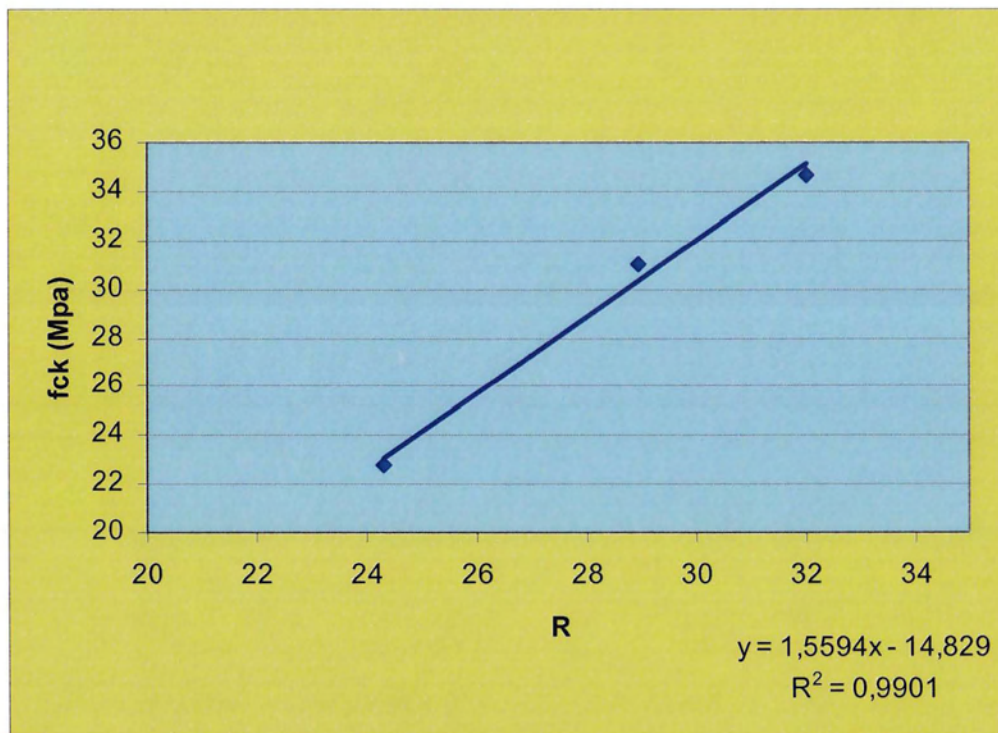
4.4. Εξαγωγή Καμπύλων Συσχέτισης

Για κάθε χρονικό διάστημα και για κάθε δοκιμή έχουμε 5 μετρήσεις, από τις οποίες έχουμε υπολογίσει τη μέση τιμή. Παρατηρούμε ότι στο δοκίμιο 09613 παρουσιάστηκαν αντιφατικά με τα άλλα δοκίμια αποτελέσματα καθώς, παρόλο που είχε τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή από όλα τα άλλα των 7 μηνών, είχε τη μικρότερη ταχύτητα και αναπήδηση. Λόγω περιορισμένου αριθμού δοκιμών, η κάθε σημαντική απόκλιση επηρεάζει αισθητά τα αποτελέσματα. Έτσι, αποφασίστηκε να εξαιρεθούν οι τιμές του δοκιμίου 09613 από τους υπολογισμούς.

Αρχικά δημιουργήθηκε η καμπύλη συσχέτισης $f_{ck} - R$ με τη χρήση ελαχίστων τετραγώνων. Χρησιμοποιήθηκαν τόσο οι μέσες τιμές αντοχής και αναπήδησης για τις 3 ηλικίες όσο και όλες οι τιμές με τα αποτελέσματα να φαίνονται στα σχήματα 4.8 – 4.9:



Σχήμα 4.8 : Διάγραμμα R- f_{ck} που προκύπτει από όλες τις μετρήσεις.



Σχήμα 4.9 : Διάγραμμα R-f_{ck} που προκύπτει από τις μέσες τιμές R_m κάθε ηλικίας σκυροδέματος.

Από το σχήμα 4.8 η σχέση αναπήδησης – θλιπτικής αντοχής προκύπτει:

$$f_{ck} = 1,4727R - 12,419$$

Από το σχήμα 4.9 η σχέση αναπήδησης – θλιπτικής αντοχής προκύπτει:

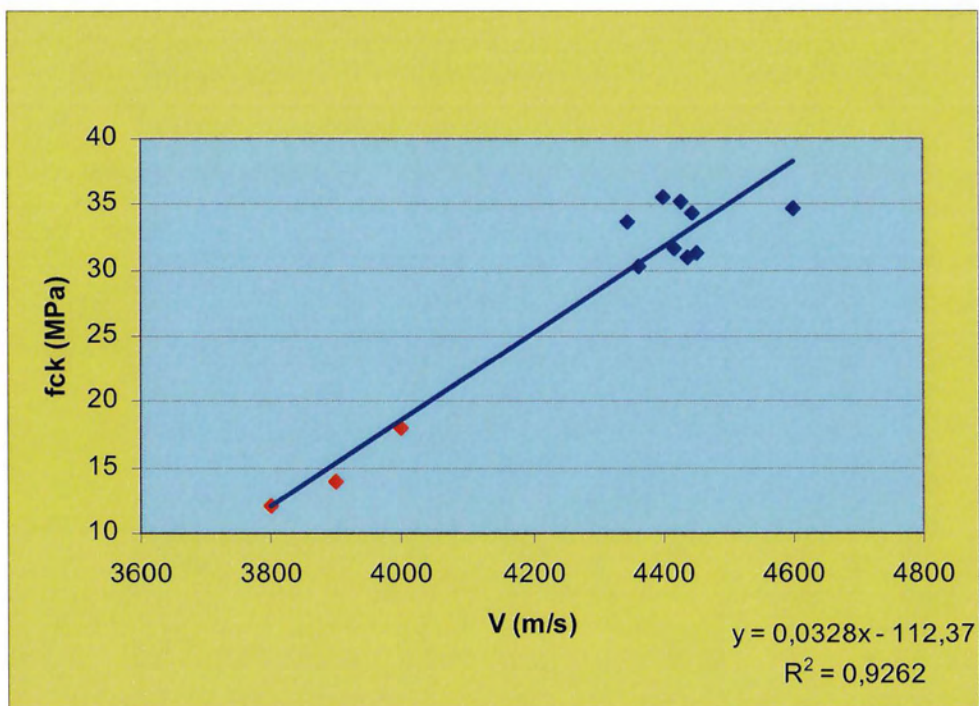
$$f_{ck} = 1,5594R - 14,829$$

Στο 3^ο κεφάλαιο αναφέρθηκε ο αντίστοιχος τύπος του Hisham Y. Qasrawi, 2000 :

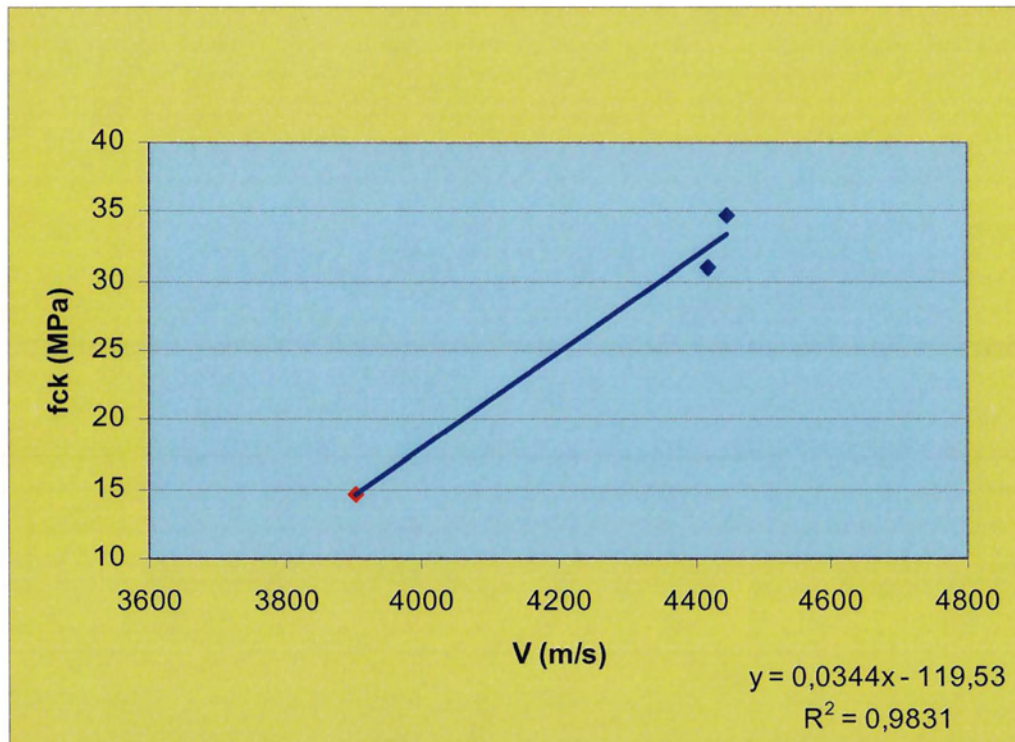
$$f_{ck} = 1,353R - 17,393$$

Παρατηρούμε ότι ο τύπος αυτός, που προέκυψε με παρόμοια πειραματική διαδικασία, έχει παρόμοια μορφή με αυτούς που προέκυψαν από τις δοκιμές της παρούσας έρευνας. Όπως είναι λογικό το R² στο σχήμα 4.9 είναι καλύτερο καθώς

υπάρχουν μόνο 3 σημεία, ωστόσο, οι διαφορές της θλιπτικής αντοχής που δίνουν οι δύο εξισώσεις συναρτήσει της αναπήδησης δεν ξεπερνούσαν το 1 MPa. Όσον αφορά τη σύγκριση με την πραγματική αντοχή των δοκιμίων, οι διαφορές εκτιμώμενης – πραγματικής αντοχής κυμαίνονται από 0,22 έως και 3,73 MPa. Επίσης, είναι προφανές ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής αναπήδησης, τόσο αυξάνεται και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Με την ίδια λογική προέκυψαν και οι καμπύλες συσχέτισης $f_{ck} - V$. Εδώ όμως δεν υπάρχουν μετρήσεις για τις 28 ημέρες οπότε για να έχει το διάγραμμα τη σωστή κλίση (όσο αυξάνεται το V αυξάνεται η αντοχή) χρησιμοποιήθηκαν κάποιες ενδεικτικές τιμές από τη βιβλιογραφία. Από το σχήμα 3.25 του Hisham Y. Qasrawi, 2000 παίρνουμε για ταχύτητες 3800 m/s, 3900m/s και 4000m/s αντοχές 12 MPa, 14MPa και 18 MPa αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 4.10 – 4.11.



Σχήμα 4.10 : Διάγραμμα $V - f_{ck}$ που προκύπτει από όλες τις μετρήσεις.



Σχήμα 4.11 : Διάγραμμα V-f_{ck} που προκύπτει από τις μέσες τιμές V_m κάθε ηλικίας σκυροδέματος

Από το σχήμα 4.10 η σχέση ταχύτητας – θλιπτικής αντοχής προκύπτει:

$$f_{ck} = 0,0328V - 112,37$$

Από το σχήμα 4.20 η σχέση ταχύτητας – θλιπτικής αντοχής προκύπτει:

$$f_{ck} = 0,0344V - 119,53$$

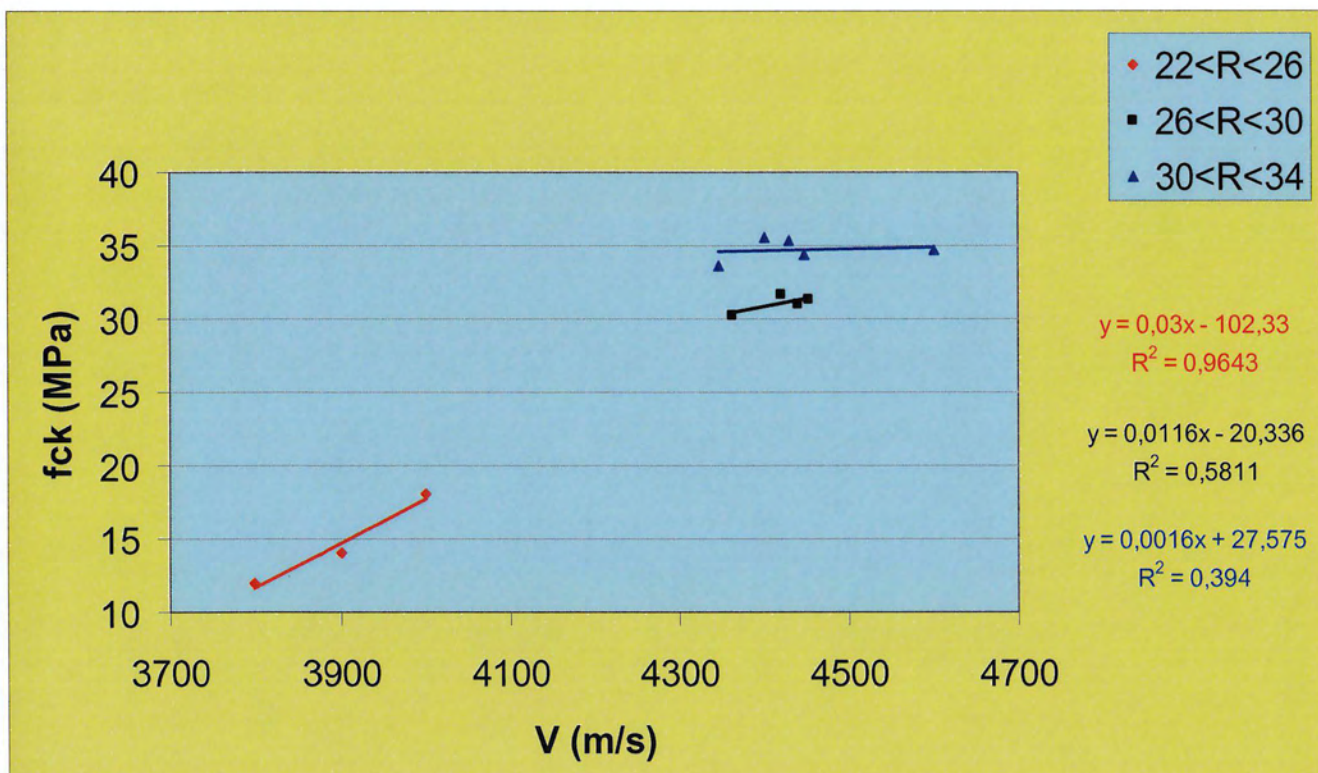
Στο 3^ο κεφάλαιο αναφέρθηκε ο αντίστοιχος τύπος του Hisham Y. Qasrawi, 2000 :

$$f_{ck} = 36,72V - 129,077$$

Οι διαφορές στη τάξη μεγέθους του συντελεστή της ταχύτητας προκύπτει γιατί στη παρούσα έρευνα οι ταχύτητες υπολογίστηκαν σε m/s ενώ ο Hisham Y. Qasrawi, 2000 τις υπολόγισε σε km/s. Όπως και προηγουμένως, οι τύποι έχουν παρόμοια μορφή.

Και εδώ, παρά τη διαφορά στα R^2 , οι διαφορές στις τιμές της αντοχής των δύο εξισώσεων έφτασαν μέχρι και τα 2 MPa. Όσον αφορά τις διαφορές εκτιμώμενης – πραγματικής θλιπτικής αντοχής, αυτές κυμαίνονται από 0,27 έως 4,03 MPa. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα αυξάνεται και η θλιπτική αντοχή. Ανάμεσα στους 7 μήνες και στον 1 χρόνο βλέπουμε αύξηση στη θλιπτική αντοχή, χωρίς σημαντικές αλλαγές στις ταχύτητες.

Στη συνέχεια, επιχειρήθηκε ένας συνδυασμός των μεθόδων γιατί, σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία, έτσι προκύπτουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Χωρίστηκαν λοιπόν οι τιμές των αναπήδησεων σε τρεις ομάδες, κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα των 28 ημερών, των 7 μηνών και του ενός χρόνου αντίστοιχα (πίνακες 4.1-4.3). Εξαλείφθηκαν και εδώ τις μετρήσεις του δοκιμίου 09613 για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω και για το διάστημα $22 < R < 26$ χρησιμοποιήθηκαν οι ταχύτητες από την βιβλιογραφία. Με ελάχιστα τετράγωνα λοιπόν, προέκυψε μια καμπύλη συσχέτισης ταχύτητας – αντοχής για το κάθε διάστημα αναπήδησης όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.12.



σχήμα 4.12 : Διάγραμμα R-V- f_{ck}

Η τετμημένη του διαγράμματος αποτελεί την ταχύτητα V (m/s) και η τεταγμένη του, την πραγματική θλιπτική αντοχή f_{ck} (MPa). Οι σχέσεις που προκύπτουν είναι οι ακόλουθες:

$$22 < R < 26: \quad f_{ck} = 0,03V - 102,33$$

$$26 < R < 30: \quad f_{ck} = 0,0116V - 20,336$$

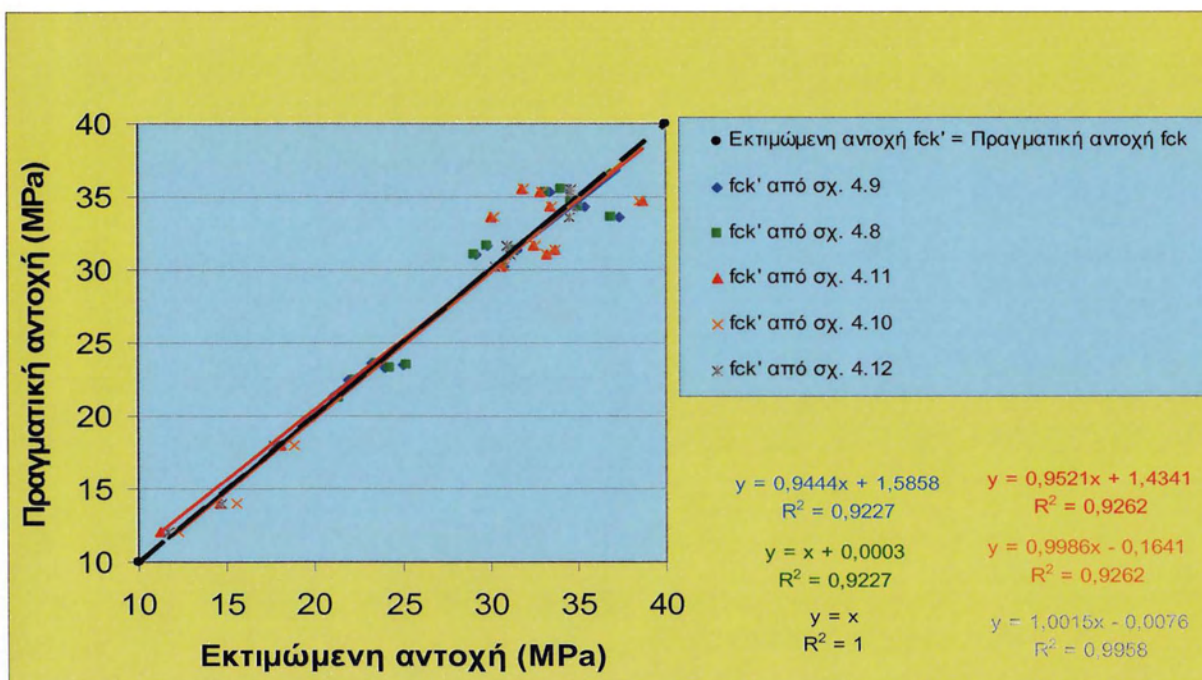
$$30 < R < 34: \quad f_{ck} = 0,0016V + 27,575$$

Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε ένα δοκίμιο του οποίου η τιμή αναπήδησης είναι 31 και η παλμική ταχύτητα 4400 m/s. Επιλέγουμε την μαύρη καμπύλη ($y = 0,0016x + 27,575$) μέσα στην οποία περικλείεται η τιμή αναπήδησης 31 (30-34) και η αντοχή που προκύπτει είναι 34,615 MPa. Οι διαφορές εδώ της εκτιμώμενης θλιπτικής αντοχής σε σχέση με την πραγματική φθάνουν μέχρι και 0,91 MPa. Είναι κάτι αντίστοιχο με το σχήμα 3.27 του Hisham Y. Qasrawi, 2000. Ωστόσο, οι συντελεστές συσχέτισης R^2 είναι αρκετά χαμηλοί και αυτό οφείλεται στον μικρό αριθμό δοκιμίων που διαθέταμε. Η παραμικρή απόκλιση λοιπόν επηρεάζει αρνητικά τα αποτελέσματα.

Τέλος, επιχειρήθηκε μια διόρθωση των αποτελεσμάτων. Για κάθε ένα από τα σχήματα 4.8 – 4.12, τοποθετήθηκε η αντίστοιχη τιμή R ή V στις εξισώσεις που προέκυψαν οπότε υπολογίστηκε η εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή για το κάθε δοκίμιο. Είναι στην ουσία η αντίστροφη διαδικασία της κατασκευής των καμπυλών, με στόχο της διόρθωσης του σφάλματος που προκαλείται από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Κάνοντας γραμμική παλινδρόμηση στις τιμές εκτιμώμενης και πραγματικής αντοχής υπολογίστηκε στην ουσία ο συντελεστής που θα δίνει τη διόρθωση της θλιπτικής αντοχής που υπολογίζεται από το σχήματα 4.8-4.12. Και εδώ, για σχεδιαστικούς λόγους, όπου δεν υπάρχει η τιμή ταχύτητας χρησιμοποιήθηκαν αυτές από τη βιβλιογραφία. Ο υπολογισμός των εκτιμώμενων θλιπτικών αντοχών παρουσιάζεται στο πίνακα 4.4 ενώ η διαδικασία διόρθωσης σφάλματος παριστάνεται γραφικά στο σχήμα 4.13.

Πίνακας 4.4: Τιμές εκτιμώμενης θλιπτικής αντοχής από σχήματα 4.8-4.12.

Δοκίμιο	R _m	V _m (m/s)	f _{ck} από σχ. 4.9	f _{ck} από σχ. 4.8	f _{ck} από σχ. 4.11	f _{ck} από σχ. 4.10	f _{ck} από V - σχ. 4.12	f _{ck}
09601	25,6	-	25,09	25,28	-	-	-	23,46
09602	23,6	-	21,97	22,33	-	-	-	22,42
09603	24,9	-	24,00	24,25	-	-	-	23,22
09604	24,4	-	23,22	23,51	-	-	-	23,58
09605	31,9	4600	34,96	34,60	38,71	38,51	34,93	34,68
09606	33,5	4346	37,34	36,85	29,99	30,20	34,52	33,61
09608	32,2	4446	35,38	35,00	33,43	33,48	34,68	34,33
09609	30,9	4430	33,40	33,13	32,86	32,93	34,66	35,29
09610	31,6	4400	34,44	34,11	31,83	31,95	34,61	35,52
09611	22,9	-	20,95	21,37	-	-	-	21,18
09612	28,2	4440	29,14	29,11	33,20	33,26	31,16	31,00
09613	-	-	-	-	-	-	-	-
09614	28,7	4420	29,87	29,80	32,51	32,60	30,93	31,63
09615	29,3	4363	30,80	30,68	30,56	30,74	30,27	30,21
09616	29,7	4453	31,53	31,36	33,66	33,69	31,32	31,30
R _m	Μέση τιμή αναπήδησης							
V _m	Μέση τιμή ταχύτητας υπερήχου							
f _{ck} από R _m	Εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή από σχ. 4.9							
f _{ck} από R	Εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή από σχ. 4.8							
f _{ck} από V _m	Εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή από σχ. 4.11							
f _{ck} από V	Εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή από σχ. 4.10							
f _{ck} από V - R	Εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή από σχ. 4.12							
f _{ck}	Πραγματική θλιπτική αντοχή							



Σχήμα 4.13: Διόρθωση σφάλματος.

Οπότε, τοποθετείται η κάθε εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή που υπολογίζεται από τα διαγράμματα 4.8 – 4.12 στο τελευταίο διάγραμμα και, χρησιμοποιώντας την καμπύλη του καθενός, υπολογίζεται μία τιμή αντοχής πιο κοντινή στην πραγματική. Πιο αναλυτικά:

για το σχήμα 4.8: $f_{ck} = f_{ck'} + 0,0003$

για το σχήμα 4.9: $f_{ck} = 0,9444f_{ck'} + 1,5858$

για το σχήμα 4.10: $f_{ck} = 0,9986f_{ck'} - 0,1641$

για το σχήμα 4.11: $f_{ck} = 0,9521f_{ck'} + 1,4341$

για το σχήμα 4.12: $f_{ck} = 1,0015 f_{ck'} - 0,0076,$

όπου f_{ck} η πραγματική αντοχή και $f_{ck'}$ η εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή.

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων θα μπορούσε να γίνει με τη χρήση των καμπυλών που προέκυψαν σε δοκίμια του ίδιου μίγματος. Παρατηρούμε γενικά ότι οι εκτιμώμενες θλιπτικές αντοχές δεν απέχουν πολύ από τις πραγματικές. Αυτό φαίνεται ειδικά στην εκτιμώμενη αντοχή που προκύπτει από το σχήμα 4.12. Το R^2 είναι πολύ κοντά στη μονάδα (0,9958), αποδεικνύοντας τη γενική αρχή ότι ο συνδυασμός των μεθόδων δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

4.5. Χρήση των Μεθόδων σε Υφιστάμενες Κατασκευές

Έστω τώρα ότι απαιτείται να πραγματοποιηθούν δοκιμές σε μια υφιστάμενη κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος. Το πρώτο βήμα είναι να παρθούν δοκίμια «καρότα» από την κατασκευή, ανάλογα με τις ανάγκες των μετρήσεων. Στο εργαστήριο ακολουθείται η ίδια διαδικασία για τον καταστροφικό και μη έλεγχο τους. Προσοχή βέβαια πρέπει να δοθεί σε κάποιους παράγοντες, καθώς το σκυρόδεμα της κατασκευής έχει πολύ μεγαλύτερη ηλικία συγκριτικά με αυτά που σκυροδετήθηκαν στο εργαστήριο.

Για τον έλεγχο αναπήδησης, που αποτελεί επιφανειακή μέτρηση, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η ενανθράκωση. Διορθωτικοί συντελεστές, οπότε, χρησιμοποιούνται στη περίπτωση που δημιουργείται σχέση αντοχής αναπήδησης με δοκίμια της κατασκευής στις 28 ημέρες (παίρνοντας δοκίμια τη μέρα της σκυροδέτησης στην κατασκευή) και εξετάζεται μη-καταστροφικά η κατασκευή μετά από μερικά χρόνια. Στη περίπτωση λοιπόν που λαμβάνονται δοκίμια κάποιας προχωρημένης ηλικίας από τη κατασκευή και δημιουργούνται καμπύλες με βάση αυτά, δε χρειάζεται διορθωτικός συντελεστής, όπως προαναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η υγρασία των δοκιμίων. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, η παλμική ταχύτητα ενός δοκιμίου στη κατασκευή διαφέρει αρκετά από αυτήν που θα υπολογιζόταν για το ίδιο δοκίμιο, εάν αυτό συντηρούταν στο εργαστήριο. Ένας τρόπος να ληφθεί υπόψη η υγρασία είναι να μετρηθεί η παλμική ταχύτητα των δοκιμίων δύο φορές, μια στη κατάσταση που βρίσκονται και μια μετά από αποξήρανση. Έτσι θα είναι δυνατόν να ληφθεί ένας συντελεστής μεταβολής της ταχύτητας, ο οποίος θα χρησιμοποιείται στον επί τόπου έλεγχο της κατασκευής.

Εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι και η ύπαρξη κενών, τόσο στην επιφάνεια όσο και εσωτερικά στο δοκίμιο. Τα κενά επηρεάζουν, τόσο την αναπήδηση όσο και την ταχύτητα. Όταν βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια λοιπόν, πρέπει να αποφεύγονται ενώ αν βρίσκονται στο εσωτερικό, η αύξηση του χρόνου διάδοσης του υπερήχου, είναι ένδειξη ύπαρξής τους. Τέλος, ο παράγοντας θερμοκρασία κατά τις μετρήσεις δεν επηρεάζει αισθητά τα αποτελέσματα. Αφού πραγματοποιήθηκε ο μη-καταστροφικός και ο καταστροφικός έλεγχος των δοκιμίων προκύπτουν παρόμοιες καμπύλες με τα σχήματα 4.8-4.12. Σε αυτή τη φάση οι δοκιμές μεταφέρονται στην κατασκευή για τον επί τόπου έλεγχο. Προφανώς δεν γίνεται να υπολογιστεί με ακρίβεια η αντοχή όλων των μελών (25% αξιοπιστία οι μη-καταστροφικές μέθοδοι με βάση τη βιβλιογραφία), ωστόσο, προσεγγιστικά θα είναι γνωστό το διάστημα τιμών μέσα στο οποίο βρίσκεται η αντοχή. Διαφορετικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο το συνδυαστικό διάγραμμα $R - V - f_{ck}$, το οποίο είναι και το πιο εύστοχο. Όσον αφορά τον οπλισμό της κατασκευής, με τη συσκευή της υπερήχου είναι δυνατόν να εντοπιστεί η θέση τους, χρησιμοποιώντας την ιδιότητα ότι η ταχύτητα διάδοσης του παλμού είναι μεγαλύτερη στον χάλυβα από ότι στο σκυρόδεμα. Σε περιοχές δηλαδή

όπου η ταχύτητα που δίνει το όργανο είναι αισθητά μεγαλύτερη συγκριτικά με γειτονικές, θα υπάρχει οπλισμός. Επομένως, στόχος είναι οι μετρήσεις να γίνονται σε σημεία όπου δεν υπάρχει οπλισμός, ώστε να αποφεύγονται σφάλματα στις μετρήσεις.

4.6. Συμπεράσματα

Γενικά οι δοκιμές έδειξαν ότι, κατά βάση, αύξηση της αντοχής σημαίνει αύξηση της αναπήδησης και των ταχυτήτων. Βέβαια σε δοκίμια της ίδιας ηλικίας, όπου οι αντοχές είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, μπορεί να σημειωθούν για μεγαλύτερη αντοχή λίγο μικρότερα R και V. Αυτό οφείλεται στην ευαισθησία των μηχανημάτων και στον ανθρώπινο παράγοντα αλλά δεν δείχνουν να επηρεάζουν τα γενικότερα αποτελέσματα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όσο αυξάνεται η ηλικία των δοκιμίων (και κυρίως μετά τους 7 μήνες) η αναπήδηση συνεχίζει να αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό ενώ οι μεταβολές των ταχυτήτων μειώνονται αισθητά.

Η παρασκευή ενός νέου μείγματος δοκιμίων με πολύ μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή (της τάξης 10 MPa μεγαλύτερη) έδωσε τη δυνατότητα σύγκρισης των τιμών αναπήδησης των 28 ημερών στις 2 περιπτώσεις (ο περιορισμένος χρόνος δεν επέτρεψε να εξετάσουμε τους 7 μήνες και τον 1 χρόνο). Να σημειωθεί ότι έγινε προσπάθεια να ταυτιστούν οι αναλογίες στα 2 μείγματα, ωστόσο, λόγω μικρών διαφορών (λιγότερο νερό στο 2^ο μείγμα) η διαφορά στη θλιπτική αντοχή ήταν σημαντική. Συγκεκριμένα στο μείγμα χαμηλότερης θλιπτικής αντοχής (αντοχές που κυμαίνονται από 21,18 MPa έως 23,58 MPa) οι τιμές αναπήδησης που υπολογίστηκαν κυμαίνονταν από 22,9 έως 25,6. Αντίθετα, στο μείγμα όπου οι θλιπτικές αντοχές κυμαίνονταν από 32,62 έως 38,28 MPa οι τιμές αναπήδησης κυμαίνονταν από 26,5 έως 28,5. Παρατηρούμε δηλαδή ότι υπάρχει αύξηση στις τιμές αναπήδησης του νέου μείγματος λόγω αυξημένης αντοχής. Όσον αφορά τις ταχύτητες στο 2^ο μείγμα αυτές κυμαίνονταν από 3600 m/s έως 4170 m/s. Στο πρώτο μείγμα όπως προαναφέρθηκε δεν μετρήθηκαν τιμές παλμικής ταχύτητας. Συγκριτικά με τη βιβλιογραφία για τις 28 ημέρες οι τιμές είναι κοντινές (3700-3900 m/s). Το συμπέρασμα λοιπόν είναι ότι για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα οι καμπύλες συσχέτισης θα πρέπει να έχουν προκύψει από συνδυασμό πολλών διαφορετικών μειγμάτων σκυροδέματος για μια συγκεκριμένη ηλικία, ή ακόμα καλύτερα, το κάθε

μείγμα να έχει τη δική του καμπύλη συσχέτισης θλιπτικής αντοχής – αναπήδησης, ταχύτητας υπερήχων. Για παράδειγμα η αποκλειστική χρήση της καμπύλης συσχέτισης θλιπτικής αντοχής – ταχύτητας υπερήχων πιθανόν να οδηγούσε σε λανθασμένα συμπεράσματα. Όπως φαίνεται και παραπάνω, για κοντινές τιμές ταχύτητας η θλιπτική αντοχή μπορεί να διαφέρει μέχρι και 10 MPa για τις 28 ημέρες. Οι τιμές αναπήδησης δείχνουν να είναι πιο αξιόπιστες όταν γίνεται αποκλειστική χρήση του κρουσίμετρου, χωρίς ωστόσο το αποτέλεσμα να είναι και εδώ ικανοποιητικό. Αντίθετα ο συνδυασμός των μεθόδων μειώνει σημαντικά τις αποκλίσεις στην εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής, κάτι το οποίο συνήθως τον καθιστά απαραίτητο.

5. ΣΥΝΟΨΗ

5.1. Σύγκριση Μεθόδων

Όπως είδαμε και στο 2^ο κεφάλαιο, υπάρχουν πολλές μη-καταστροφικές τεχνικές κάθε μια από τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικό λόγο. Σε περιπτώσεις όπου η εμφάνιση παίζει ρόλο, όπως για παράδειγμα ένα εργοστάσιο προκατασκευών, το κρουσίμετρο και ο υπέρηχος είναι πιο κατάλληλα για μέτρηση σε σχέση με τις υπόλοιπες μη καταστροφικές μεθόδους για το λόγο ότι προκαλούν αμελητέα επιφανειακή φθορά. Σε πιο μεγάλες κατασκευές ωστόσο αυτές οι 2 μέθοδοι πιθανόν να έχουν εμπόδια όπως η τραχύτητα της επιφάνειας για το κρουσίμετρο και η πρόσβαση σε μία μόνο πλευρά ενός στοιχείου για τον υπέρηχο. Επιπλέον, το κρουσίμετρο είναι ακατάλληλο σε περιπτώσεις όπου η επιφάνεια του στοιχείου έχει υποστεί κάποιου είδους χημική (φωτιά) ή άλλη φθορά. Αντιθέτως, χρησιμοποιώντας τον υπέρηχο, μπορεί να καθοριστεί το προφίλ των ζημιών το οποίο, μπορεί μεν να υστερεί σε ακρίβεια, αλλά μπορεί να βοηθήσει το μηχανικό στην απόφαση για το αν θα επέμβει ή όχι σε κάποιο στοιχείο.

Η αποτίμηση της ποιότητας των εργασιών που έγιναν κατά την σκυροδέτηση απαιτεί τον έλεγχο ύπαρξης διαφόρων κενών σε κάποιο μέλος το οποίο πιθανόν να χρειαστεί τοπική ενίσχυση. Ο υπέρηχος, η ακτινογράφιση και η ραδιομετρία είναι οι μόνες τεχνικές για να πραγματοποιηθεί αυτός ο έλεγχος. Συνοπτικά παρακάτω φαίνεται ποιες μέθοδοι είναι καταλληλότερες για τη κάθε διαδικασία:

- Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος → Κρουσίμετρο Αναπήδησης, Υπέρηχος
- Μέτρο Ελαστικότητας → Υπέρηχος,
Μέθοδος ακουστικής πρόσκρουσης
- Θέση οπλισμού → Διεσδυτικό ραντάρ εδάφους, ακτίνες X
- Πάχος μέλους σκυροδέματος → Μέθοδος ακουστικής πρόσκρουσης,
Διεσδυτικό ραντάρ εδάφους
- Μείωση εμβαδού οπλισμού → Ραδιογραφία
- Εντοπισμός ατελειών, κενών → Μέθοδος ακουστικής πρόσκρουσης,
Ραδιογραφία, Υπέρηχος,
Διεσδυτικό ραντάρ εδάφους

5.2. Μη Καταστροφικές Μέθοδοι στο Μέλλον

Μέθοδοι ολογραφικής παρέμβασης πιθανότατα θα χρησιμοποιηθούν στο μέλλον στον εντοπισμό πολύ μικρών μετακινήσεων. Το πανεπιστήμιο του Sydney τείνει να εξετάσει τις μετακινήσεις σε ένα δοκίμιο σκυροδέματος σαν νερό που απορροφάει το δοκίμιο χρησιμοποιώντας τις αρχές της ολογραφίας. Αν και η μέθοδος βρίσκεται ακόμα σε πολύ πειραματικό στάδιο, δεν χρειάζεται και πολύ φαντασία για να δει κανείς τις δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει μελλοντικά. Είναι πειστικό, για παράδειγμα, ότι η ολογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με κινηματογραφική τέχνη για την παρατήρηση εντάσεων που πιθανόν να προκληθούν σε μία υφιστάμενη κατασκευή από κάποια ώθηση.

Μαγνητικές μέθοδοι, γνωστές σαν Magnetostriuctive Methods, έχουν χρησιμοποιηθεί για αρκετά χρόνια στον προσδιορισμό ελαστικών σταθερών σε βράχους. Παρόλο που είναι απλές σχετικά μέθοδοι δεν υπάρχουν στοιχεία για αυτές στη βιβλιογραφία των μη-καταστροφικών μεθόδων.

Η ανάπτυξη στη Ρουμανία των συνδυαστικών μη-καταστροφικών μεθόδων δείχνει να είναι ένα πολύ υποσχόμενο αντικείμενο για το μέλλον. Ο συνδυασμός μεθόδων έχει ιδιαίτερη αξία στις μη καταστροφικές μεθόδους. Βέβαια, υπάρχουν ακόμα κάποια χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, για τα οποία δεν έχουμε λάβει ικανοποιητικά αποτελέσματα από τις μετρήσεις. Για παράδειγμα, μια ποιοτική εξαγωγή αποτελεσμάτων για την ικανότητα άντλησης θα μας έδινε πολύ χρήσιμες πληροφορίες.

Εάν οι αντικειμενικοί στόχοι που τέθηκαν από τους Kelly και Vail [74] για τον έλεγχο της σύνθεσης του σκυροδέματος αμέσως μετά την παρασκευή του και πριν την τοποθέτησή του, με μεγάλη ακρίβεια, ένα σημαντικό κομμάτι της έρευνας των Robertson και Colquhoun [75] θα είχε πραγματοποιηθεί.

5.3. Γενικά συμπεράσματα

Οι μη-καταστροφικές μέθοδοι μελετούνται και εφαρμόζονται σε πολλές χώρες για πάνω από 25 χρόνια. Χρησιμοποιούνται όχι αποκλειστικά για έρευνες αστοχίας αλλά για ποιοτικό έλεγχο, για αποτίμηση επισκευής ή ακόμα και για την ολική αντοχή. Όπως είναι φυσικό λοιπόν, πρέπει να είναι αξιόπιστες, να δίνουν συνεπή αποτελέσματα και να είναι εύκολα και γρήγορα στη χρήση. Για να δώσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα, πρέπει να έχουν μία συγκεκριμένη δομή και ρόλο στην κατασκευαστική βιομηχανία. Για να είναι αποτελεσματικές στον έλεγχο της αντοχής της κατασκευής, θα πρέπει οι δοκιμές να συσχετιστούν πριν την εκκίνηση των εργασιών κατασκευάζοντας ενδεικτικά μέλη και παίρνοντας πυρήνες για να εκλάβουμε τις πληροφορίες που θέλουμε.

Είναι γεγονός ότι οι μη-καταστροφικές μέθοδοι προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες και με την προϋπόθεση της καλής γνώσης αυτών και των ορίων που διαθέτουν θα μπορούσαν να διαδραματίσουν πολύ σημαντικό ρόλο στην καθημερινή παραγωγή και χρήση του σκυροδέματος. Μέχρι και σήμερα η χρήση τους δεν έχει αποκτήσει αυτόν τον σημαντικό ρόλο για 2 σημαντικούς λόγους. Πρώτον λόγω της εμμονής στις καταστροφικές μεθόδους αλλά και στην πίστη ότι οι μη-καταστροφικές μέθοδοι θα έπρεπε να δίνουν εξαιρετικά ακριβή αποτελέσματα σε κάθε τεστ σύμφωνα με την καταστροφική μέθοδο. Ένας 2^{ος} και πολύ σημαντικός λόγος είναι ότι πολύ λίγοι μηχανικοί είναι πραγματικά εξοικειωμένοι με το αντικείμενο με αποτέλεσμα να μην μπορούν να το εμπιστευτούν και να παραμένουν «πιστοί» στις παραδοσιακές μεθόδους. Θα πρέπει λοιπόν να παρέχουν οικονομικά οφέλη στον κάθε ανάδοχο και βελτιωμένη εγγύηση ποιότητας στον σχεδιαστή, ώστε να θεωρηθούν απαραίτητο εργαλείο στις κατασκευές. Γι'αυτό, η εύρεση καινούριων ελέγχων θα πρέπει να γίνεται με γνώμονα τις ανάγκες που προκύπτουν κατά την κατασκευή και όχι απλά να πολλαπλασιάζονται οι έλεγχοι αντοχής. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι οι μη-καταστροφικές μέθοδοι αποτελούν ένα δυνατό όπλο για τον ποιοτικό έλεγχο, γι'αυτό, σαν όλα τα «εργαλεία δύναμης», θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με σύνεση και κατανόηση.

Η κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, και σε πολλές περιπτώσεις η προσωπική προτίμηση ή η εμπειρία του παρελθόντος επηρεάζει στην επιλογή της μεθόδου από τον ερευνητή. Η διαφορά της αντοχής, που υπολογίζεται

στο εργαστήριο μέσω στατιστικών δειγμάτων, και της αντοχής, που προσδιορίζεται επί τόπου σε πραγματικές κατασκευές, είναι συχνά σημαντική και συχνά μεγαλύτερη από τη διαφορά της αντοχής που προσδιορίζεται από καταστροφικές και μη καταστροφικές δοκιμές [76]. Έτσι η ακρίβεια εκτίμησης της αντοχής είναι ικανοποιητική, μόνο στις περιπτώσεις που η ποιότητα του σκυροδέματος στην κατασκευή είναι περίπου ίδια με αυτήν των δοκιμών που ελέγχθηκαν στο εργαστήριο και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση της κάθε μεθόδου. Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι από τη στιγμή που δεν υπάρχει κοινά αποδεκτή μαθηματική σχέση αντοχής – αναπήδησης ή αντοχής – ταχύτητας υπέρηχων, η αντοχή του σκυροδέματος δεν μπορεί άμεσα να προσδιορίζεται από αυτές τις μεθόδους αλλά και από οποιαδήποτε μη καταστροφική μέθοδο. Η παλμική ταχύτητα όπως γνωρίζουμε επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η αναλογία του μίγματος, ο τύπος των αδρανών, η ηλικία του σκυροδέματος, η υγρασία και άλλοι. Οι παράγοντες όμως που επηρεάζουν αισθητά την αντοχή μπορεί να έχουν μικρή επιρροή στην παλμική ταχύτητα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η εκτίμηση της αντοχής από τον υπέρηχο να μην είναι αξιόπιστη, αν δεν υπάρχει μια προκαθορισμένη καμπύλη. Επιπλέον, δεν υπάρχουν ξεκάθαροι κανόνες για το πώς μεταβάλλεται η σχέση ταχύτητα – αντοχή όταν αλλάζει η αναλογία του μίγματος. Έτσι, υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα όταν κάποιος χρησιμοποιεί τον υπέρηχο για να καθορίσει την αντοχή σκυροδέματος διαφορετικών μιγμάτων. Είναι απαραίτητοι συμπληρωματικοί έλεγχοι για τον υπολογισμό της αντοχής και της ταχύτητας σε δοκίμια, που έχουν ληφθεί από την κατασκευή.

Οι μη-καταστροφικές μέθοδοι είναι έμμεσες μέθοδοι δηλαδή η κάθε ιδιότητα που εξετάζουμε προκύπτει από τη μέτρηση μιας άλλης ιδιότητας ή χαρακτηριστικού. Σωστή χρήση αυτών των μεθόδων απαιτεί βαθιά κατανόηση των βασικών κανόνων και των διάφορων παραγόντων που επηρεάζουν τη μέτρηση. Μερικές από τις αμφιβολίες που προέκυψαν για τις μη-καταστροφικές μεθόδους οφείλονται στην λανθασμένη χρήση και όχι στην ανεπάρκειά τους. Υπάρχει ανάγκη λοιπόν για εκπαίδευση ώστε να χρησιμοποιούνται σωστά οι υπάρχουσες μέθοδοι. Η εκπαίδευση θα πρέπει να αφορά τους θεμελιώδεις κανόνες της κάθε μεθόδου, τους παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα και τη σωστή χρήση του μηχανήματος. Αυτή η εκπαίδευση δεν πρέπει να μένει απλά σε ένα εγχειρίδιο του κατασκευαστή, αλλά να είναι βαθύτερη. Η κάθε μέθοδος έχει την δικιά της πολυπλοκότητα, οπότε δεν είναι

εφικτό να μπορεί να τις εφαρμόζει ο καθένας απλά πατώντας ένα κουμπί. Ο κατάλληλος τρόπος εκπαίδευσης λοιπόν, είναι μέσα από επίσημους κύκλους αφιερωμένους στο αντικείμενο. Οι δοκιμές θα πρέπει να γίνονται με προσοχή και πειθαρχία από ή υπό την επίβλεψη ενός έμπειρου μηχανικού ο οποίος κατανοεί τις αντοχές και τους περιορισμούς των δοκιμών και γενικά έχει το κατάλληλο υπόβαθρο στη τεχνολογία του σκυροδέματος. Στα χέρια του κατάλληλου προσωπικού, οι διαδικασίες συνήθως αποδίδουν ανεκτίμητα αποτελέσματα, τα οποία θα μπορούσαν να ληφθούν μόνο προξενώντας σημαντική ζημιά στη κατασκευή. Τα καλύτερα αποτελέσματα στο ελάχιστο κόστος λοιπόν, μπορούν να παρθούν με προσεκτική επιλογή ή συνδυασμό μη-καταστροφικών μεθόδων σε συνδυασμό με ημι-καταστροφικές, που αφορούν κυρίως τα δοκίμια που παίρνονται από τη κατασκευή και εξετάζονται στο εργαστήριο. Η δουλειά που γίνεται στα εργαστήρια συνεχώς προοδεύει, με νέες τεχνικές καθώς και βελτιώσεις σε υπάρχουσες, δίνοντας καλύτερη εκτίμηση για τη φθορά και την αντοχή της κατασκευής. Τέλος, ενώ λοιπόν υπάρχει αρκετή γνώση όσον αφορά τον επί τόπου έλεγχο κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα, αρκετή έρευνα πρέπει να γίνει ώστε να επιτευχθεί ένας ουσιαστικός επί τόπου μη-καταστροφικός έλεγχος τενόντων, σε προεντεταμένες κατασκευές.

Βιβλιογραφία

- [1] LESHCHINSKY, Non-destructive methods Instead of specimens and cores, quality control of concrete structures, in: L. Taerwe, H. Lambotte (Eds.), Proceedings of the International Symposium held by RILEM, Belgium, E&FN SPON, U.K., 1991, pp. 377±386
- [2] Ι.Ν. ΠΡΑΣΙΑΝΑΚΗΣ, η ελληνική Εταιρεία Μη Καταστροφικών Ελέγχων (ΕΛΕΜΚΕ) – ένας ανεξάρτητος διαπιστευμένος κατά ΕΛΟΤ – iso – en/iec 17024 φορέας
- [3] Ι.Ν. ΠΡΑΣΙΑΝΑΚΗΣ ΚΑΙ Π. ΓΚΙΟΚΑΣ, Προσδιορισμός Μηχανικών Χαρακτηριστικών Σκυροδέματος Ηλικίας 28 Ημερών και 28 Ετών με Καταστροφικές Μεθόδους και Υπερήχους, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, Ι, τεύχ. 1-2, 2002
- [4] R. JONES, *Non-destructive testing of concrete*. Cambridge University Press, Cambridge (1962)
- [5] In Place Methods for Determination of Strength of Concrete; ACI Manual of Concrete Practice, Part 2: Construction Practices and Inspection Pavements, ACI 228.1R-989, Detroit, MI, 1994, p. 25
- [6] E DIN EN 12399 (July 1996) Testing of concrete – Determination of the Pull-Out Force (Prüfung von Beton Bestimmung der Ausziehkraft; German Version prEN 12399: 1996)
- [7] M. LEVITT, Non-destructive testing of concrete by the surface absorption method I.C.E
- [8] J. KOLEK, Non-destructive testing of concrete by hardness methods I.C.E. Symposium on Non-Destructive Testing of Concrete and Timber, London, June 11 - 12 (1969)
- [9] E. A. WHITEHURST, Evaluation of concrete properties from sonic test. *Am. Concr. Inst. Monograph No. 2* (1966)
- [10] L. BRUNARSKI, Recommendations for the use of resonance methods for testing concrete. *Mat. Struct. Test, Res., 2, 10, 269-273* (1969)
- [11] B. G. LONG, H. J. KURTZ and T. A. SANDENAW, An instrument and a technique for field determinations of the modulus of elasticity and flexural strength of concrete. *J. Am. Concr. Inst., 16, 3, 217–(1945) 217–281*

- [12] J. ANDERSEN and P. NERENST, Wave velocity in concrete. *Am. Concr. Inst. Pro*, 48, 8, 613-635(1952)
- [13] ASTM C 597-83 (Reapproved 1991), Test for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM, U.S.A., 1991
- [14] Ι.Ν. ΠΡΑΣΙΑΝΑΚΗΣ και Σ.Κ. ΚΟΥΡΚΟΥΛΗΣ, Πειραματική Αντοχή των Υλικών, Αθήνα 1999
- [15] J. A. FORRESTER, Gamma radiography of concrete. I.C.E. Symposium on Non-Destructive Testing of Concrete and Timber, London, June 11-12 (1969)
- [16] J. BROCARD, Application of radioisotopes to non-destructive testing of materials. RILEM Bulletin, No. 20 (1954)
- [17] J.P. FACKLER, Gamma-ray tests on Concrete. RILEM Bulletin No. 20 (1954)
- [18] R. JONES, A review of the non-destructive testing on concrete. I.C.E. Symposium on Non-Destructive testing of Concrete and Timber, London, June 11-12 (1969)
- [19] TIMOSHENKO, S., AND GOODIER, J., *Theory of Elasticity*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 1970, 567 pp
- [20] ELMORE, W. C., AND HEALD, M. A., *Physics of Waves*, Dover Publications, New York, 1985, 477 pp
- [21] STEARNS, S. D., *Digital Signal Analysis*, Hayden Book Co., Rochelle Park, 1975, 280 pp
- [22] KONG, F. N., WESTERDAHL, H., A very wide bandwidth step frequency GPR for testing concrete structures, Proceedings of the GPR Conference (1998)
- [23] MALHOTRA, V.M., 1976, Testing Hardened Concrete; Nondestructive Methods, American Concrete Institute Monograph No. 9, ACI/Iowa State University Press, 204p.
- [24] J. KOLEK, Analysis of answers to Rilem Questionnaire on the Schmidt rebound hammer, *Materials and Structures, Testing and Research*, 2, 10, 285-291 (1969)
- [25] J. KOLEK, "An appreciation of the Schmidt rebound hammer". Magazine of Concrete Research, Vol. 10, No. 28, March pp. 27-36 (1958)
- [26] MCCARROLL D. The Schmidt hammer as a measure of degree of rock surface weathering and terrain age. In: Beck C, editor, Dating in exposed and surface contexts Mexico: University of New Mexico Press; 1994 p. 29-45.

- [27] TANIGAWA Y, BABA K, MORI H. Estimation of concrete strength by combined non-destructive testing method. ACI SP 82; 1988 p. 57-76
- [28] Architectural Institute of Japan. Manual of non-destructive test methods for the evaluation of concrete strength; 1983 p. 26 (in Japanese)
- [29] Kim CY, Lee Y, Kim MS, Kim JK, Yun YH, Experimental research of the influence of carbonation on the concrete characteristics, In: Proceedings of the 9th EASEC 2003, EASEC9-437
- [30] CHAPLIN, M.I.L 'Abrasion resistant concrete floors' *International Conference on Concrete Slabs, Material Design, Construction and Finish, Dundee, Scotland, 3-5 April 1979*
- [31] Πρόσβαση στο: [http:// www.proceq.com](http://www.proceq.com) – Original Schmidt Concrete Test Hammer
- [32] KNAB, L.J., BLESSING, G.V., CLIFTON, J.R., Laboratory evaluation of ultrasonics for crack detection in concrete. ACI J. 80 (1983) 17
- [33] JONES, R., FACAOANU, I., Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method, Materials and Structures Research and Testing, Paris) 2 (19) (1969) 275
- [34] KRAUTKRAMER, J., KRAUTKRAMER, H., Ultrasonic Testing Fundamentals. Springer-Verlag. New York (1969)
- [35] CHUNG, H.W., LAW, K.S., Diagnosing *In situ* Concrete by Ultrasonic Pulse Technique, Concr. Int. (1983) 42.
- [36] BUNGEY, J.H, The Testing of Concrete in Structures, Chapman and Hall, New York (1982) — The Influence of Reinforcement on Ultrasonic Pulse Velocity Testing, ACI SP 82 (Malhotra, V. M., Ed.) (1984) 229
- [37] CHUNG, H.W., Effect of Embedded Steel Bars upon Ultrasonic Testing of Concrete, Mag. Concr. Res. London 30 (102) (1978) 19
- [38] E. A. WHITEHURST, Use of the soniscope for measuring setting time of concrete. Proc. *ASTM*, 51, 1166-1183 (1951)
- [39] R. H.ELVERY and D. W. VALE, Pundit-A digital display ultrasonic instrument for concrete testing. RILEM Working Party on Non-Destructive Testing of Concrete, Wexham Springs, England, June 23-26 (1970)
- [40] R. JONES, The testing of concrete by an ultrasonic pulse technique, RILEM Bulletin No. 19 (1954)

- [41] SCHNEIDER U, editor. CIB W14 Report, repairability of re damaged structures, Fire Safety J 1990); 16: 251–336
- [42] KHOURY GA. Effect of .re on concrete and concrete structures, Progress in Structural Engineering Materials 2000;2:429–47
- [43] FELICETTI R, GAMBAROVA PG. On the residual properties of high performance siliceous concrete exposed to high-temperature, In: Pijaudier-Cabot G, Bittnar Z, Gerard B, editors. A volume in honour of Prof. Z.P. Bazant's 60th birthday, Hermes Science Publications; 1999 p. 167–86
- [44] TAY DCK, Tam CT. In situ investigation of strength of deteriorated concrete, Construction and Building Materials 1996;10: 17–26
- [45] CIONI P, CROCE P, SALVATORE W, Assessing .re damage to R/C Elements, Fire Safety J. 2001;36:181–99.
- [46] N.R. SHORT, J.A. PURKISS, S E. Guise, Assessment of .re-damaged concrete, in: Proceedings of the Concrete Communication Conference, British Cement Association, 2000, pp. 245–254.
- [47] SHORT NR, PURKISS JA, GUISE SE. Assessment of re-damaged concrete using crack density measurements. Structural Concrete 2000;3:137–43
- [48] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Pré sentation des techniques de diagnostic de l'état d'un be ton soumis a` un incendie. Report ME 62, 2005, 114p [in French]
- [49] BENEDETTI A, On the ultrasonic pulse propagation into .re damaged concrete. ACI Structural J 1998;96(3):257–71
- [50] ABRAHAM O, DE' ROBERT X, Non-destructive testing of .red tunnel walls: the Mont-Blanc Tunnel case study. NDT&E International 2003;36:411–8
- [51] FELICETTI R, New NDT techniques for the assessment of re damaged RC structures, Technical report, Department of Structural Engrg. (DIS): Politecnico di Milano; 2005, 26pp.
- [52] BUNGEY JH, The testing of concrete in structures, Glasgow: Blackey Academic and Professional; 1996. 291p.
- [52] TEODORU, G., ZERSTORUNGSFREIE BETONPRUFUNGEN, (Nondestructive Testing of Concrete), Beton-Verlag, Dusseldorf, 1989, p. 1.58
- [53] POPOVICS, S., KOMLOS, K. & POPOVICS, J.S., Comparison of DIN/ISO (Entwurf) to several standards on determination of ultrasonic puls: velocity in

concrete, *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Berlin, September 1995 (in press)

[54] POPOVICS, S. & POPOVICS, J.S., Misapplications of the standard ultrasonic pulse velocity method for testing concrete. *Structural Materials Technology An – NDT Conference*, eds R.J. Scancellia and M.E. Callahan, Technomic, Atlantic City, New Jersey, 23-25 February, 1994, pp. 241-246

[55] POPOVICS, S. & POPOVICS, J.S., A critique of the ultrasonic pulse velocity method for testing concrete. *Nondestructive Testing of Concrete Elements and Structures*, eds F. Ansari & S. Strue, Proc. ASCE, San Antonio, Texas, April, 1992, pp. 94-103

[56] POPOVICS, S., Stato attuale della determinazione della resistenza del calcestruzzo mediante la velocità degli impulsi in America (Present State of the Determination of Concrete Strength by Pulse Velocity in America), *Il Cemento*, Anno 83", 3, July-September 1986, pp. 117-128

[57] POPOVICS, S. & POPOVICS, J.S., Potential ultrasonic techniques based on surface waves and attenuation for damage evaluation in concrete - A Review, *Diagnosis of Concrete Structures*, ed T. Javor, Proc. of the International RILEM-IMEKO Conference, Expertcentrum, Bratislava, 1991, pp. 101-104

[58] POPOVICS, J.S., Are advanced ultrasonic techniques suitable for concrete? - An exploratory investigation, Proc. *Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials*, eds B.A. Suprenant *et al.*, University of Colorado, Boulder, Colorado, October, 1990, pp. 327-339

[59] FACAOARU, I., 1970, "Non-destructive Testing of Concrete in Romania," Proceedings, Symposium on Non-Destructive Testing of Concrete and Timber, 11-12 June, 1969, Institution of Civil Engineers, pp.13-17

[60] SAMARIN, A., 1991, "Combined Methods", Chapter 8 in Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, V.M. Malhora and N.J. Carino, Eds., CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 189-201

[61] CIANFRONTE, F. AND FACAOARU, I., 1979, "Study on the Introduction into Italy on the Combined Non – Destructive Method for the determination of In Situ Strength," *Materials and Structures (RILEM)*, Vol. 12, No. 71, Sept-Oct, pp. 413-424

[62] ASTM C 805-85, Test for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM, U.S.A., 1993.

- [63] HISHAM Y. QASRAWI, Concrete strength by combined nondestructive methods Simply and reliably predicted, Civil Engineering Department, College of Engineering, Applied Science University, Amman 11931, Jordan, 2000
- [64] D. MONTGOMERY, G. RUNGER, Applied Statistics and Probability for Engineers, 2nd edn. Wiley, 1999
- [65] D. MONTGOMERY, G. RUNGER, Applied Statistics and Probability for Engineers, 2nd edn. Wiley, 1999
- [66] U. BELLANDER, Concrete strength in finished structures: Part 3. Nondestructive testing methods, Investigation in laboratory in-situ research, Swed Cem Concr Res Inst 3 (1977) 77
- [67] BS 1881: Part 120: 1983, Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cores, BSI, U.K., 1983
- [68] ANG, A. H. –S., AND TANG, W. H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design, V. I, Basic Principles, John Wiley & Sons, New York, 1975, 409 pp.
- [69] SCHMITT, S. A., Measuring Uncertainty – An Elementary Introduction to Bayesian Statistics, Addison – Wesley Publishing Co., Reading, 1969, 400 pp.
- [70] CORNELL, C. A., “Bayesian Statistical Decision Theory and Reliability – Based Design,” International Conference on Structural Safety and Reliability, Pergamon Press, Elmsford, 1972, pp. 47-66
- [71] BAZANT, ZDENEK P., AND CHERN, JENN – CHUAN, “Bayesian Statistical Prediction of Concrete Creep and Shrinkage,” ACI JOURNAL, Proceedings V. 81, No. 4, July – Aug. 1984, pp. 319 – 330
- [72] DI LEO, A.; PASCALE, G.; AND VIOLA, E., “Core Sampling Size in Nondestructive Testing of Concrete, SP – 82, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp. 459 – 477
- [73] TANG, W. H., “A Bayesian Evaluation of Information for Foundation Engineering Design,” Proceedings, 1st International Conference on Applications of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering, Hong Kong University Press, 1971, pp. 174 – 185
- [74] R. T. KELLY and J. W. VAIL, Rapid analysis of fresh concrete. *Concrete*, 2, 4 (t9ϵ)8, 140-145 (Part 1); 2, 5, May (1968), 206-210 (Part 2)

[75] J. A. ROBERTSON and R. S. COLQUHOUN, Instant testing of concrete mixes.
(*Engineering Public Wks. Rer.*, 64, 754, 453-456 (1969))

[76]] S. POPOVICS, “Analysis of the Concrete Strength Versus Ultrasonic Pulse Velocity Relationship”, *Materials Evaluation*, February 2001, pp. 123-130

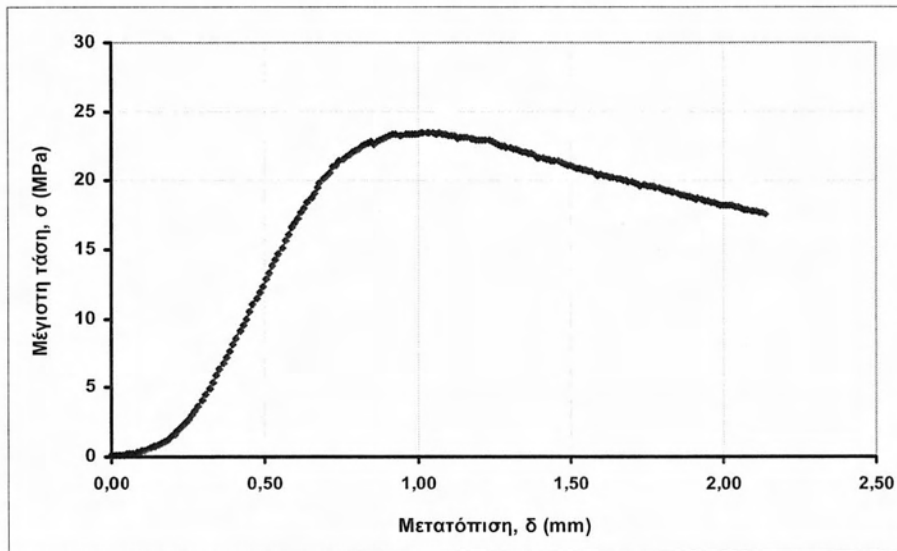
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας 1

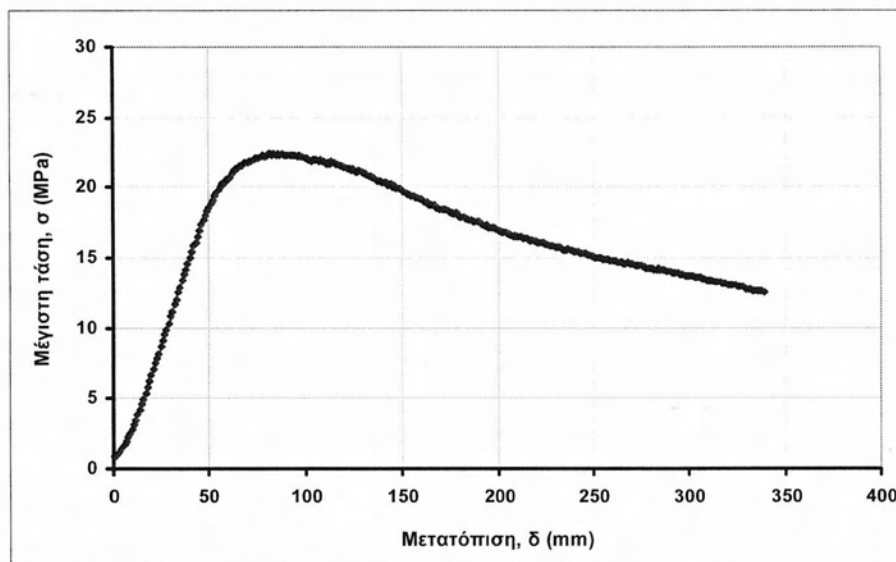
Κωδικός Δοκιμίου	Τιμές Αναπήδησης, R (ηλικία 28 ημερών)							
09601	29	31	30	30	30	30	28	30
	27	25	23	23	24	21	23	
09602	25	23	25	23	27	23	25	23
	22	24	26	25	23	25	22	
09603	25	25	27	26	25	23	29	26
	29	30	25	25	22	23	24	
09604	22	25	25	24	28	25	25	24
	24	23	27	25	22	26	25	
09611	22	19	22	21	24	25	25	26
	27	24	26	26	24	25	25	
Κωδικός Δοκιμίου	Τιμές Αναπήδησης, R (ηλικία 7 μηνών)							
09612	31	29	30	31	26	25	26	26
	24	27	30	29	29	30	30	
09613	31	30	30	25	27	28	27	30
	31	27	25	26	24	24	24	
09614	30	27	27	28	29	28	29	30
	28	27	30	29	29	30	29	
09615	33	29	29	31	24	31	30	30
	30	29	28	29	28	28	30	
09616	31	30	28	28	30	31	30	29
	29	32	29	28	31	30	30	
Κωδικός Δοκιμίου	Τιμές Αναπήδησης, R (ηλικία 1 έτους)							
09605	33	32	34	30	33	31	30	32
	28	31	35	33	31	34	32	
09606	35	33	33	34	33	34	33	32
	34	33	32	34	34	34	33	
09608	35	29	33	31	30	30	32	29
	28	31	36	36	36	31	36	
09609	32	29	31	29	29	32	30	29
	28	32	32	33	33	32	33	
09610	34	31	29	28	33	30	28	28
	32	29	33	34	36	34	35	

Πίνακας 2

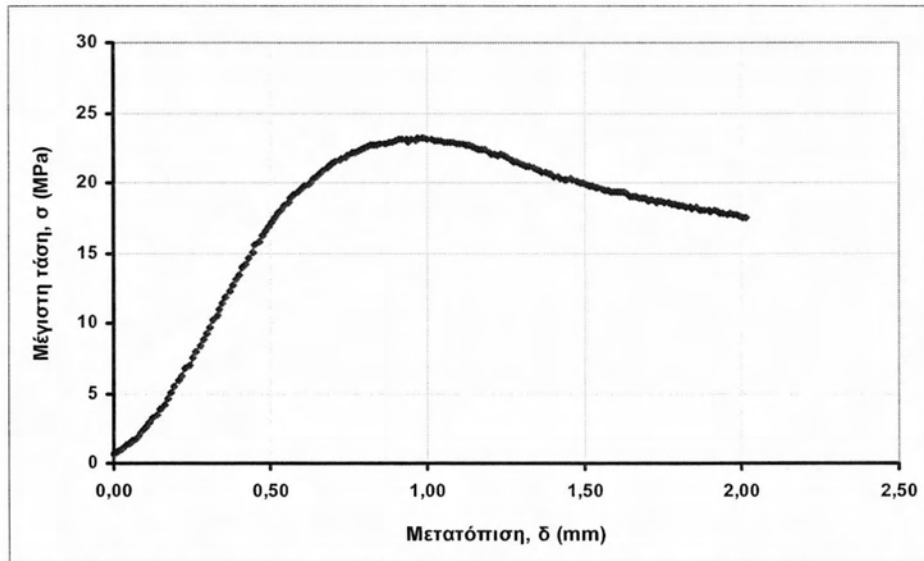
Κωδικός Δοκιμίου	Ταχύτητα Υπερήχου, V (m/s) (7 μήνες)		
	09612	4480	4450
09613	4440	4300	3850
09614	4440	4460	4360
09615	4430	4440	4520
09616	4450	4450	4460
Κωδικός Δοκιμίου	Ταχύτητα Υπερήχου, V (m/s) (1 έτος)		
	09605	4640	4590
09606	4120	4440	4480
09608	4430	4430	4480
09609	4360	4480	4450
09610	4350	4440	4410

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

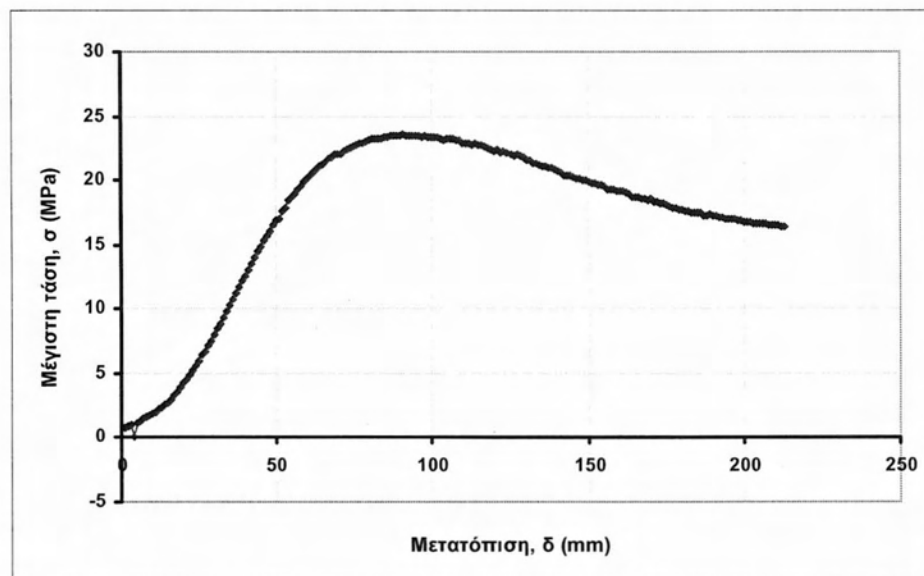
Σχήμα 2.1α : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 09601
(ηλικία 28 ημέρες)



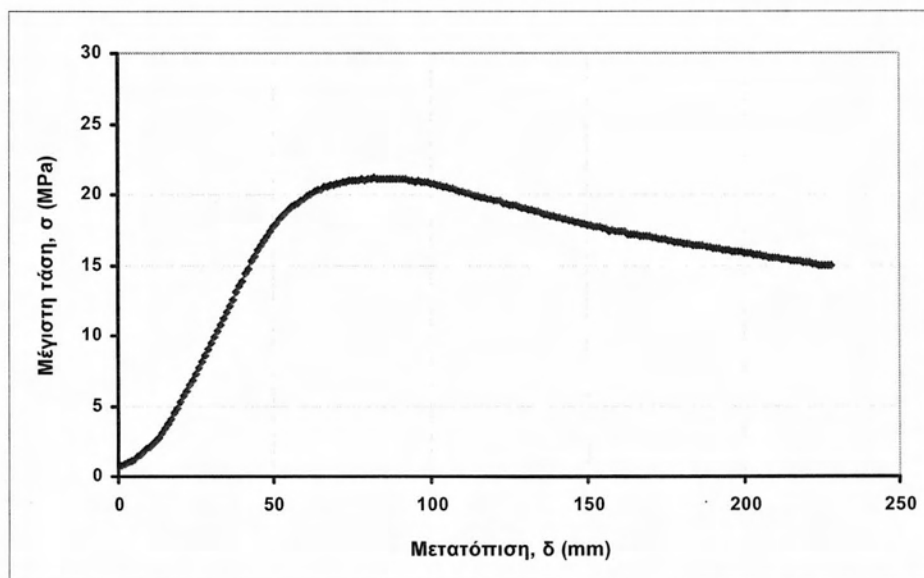
Σχήμα 2.1β : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 09602
(ηλικία 28 ημέρες)



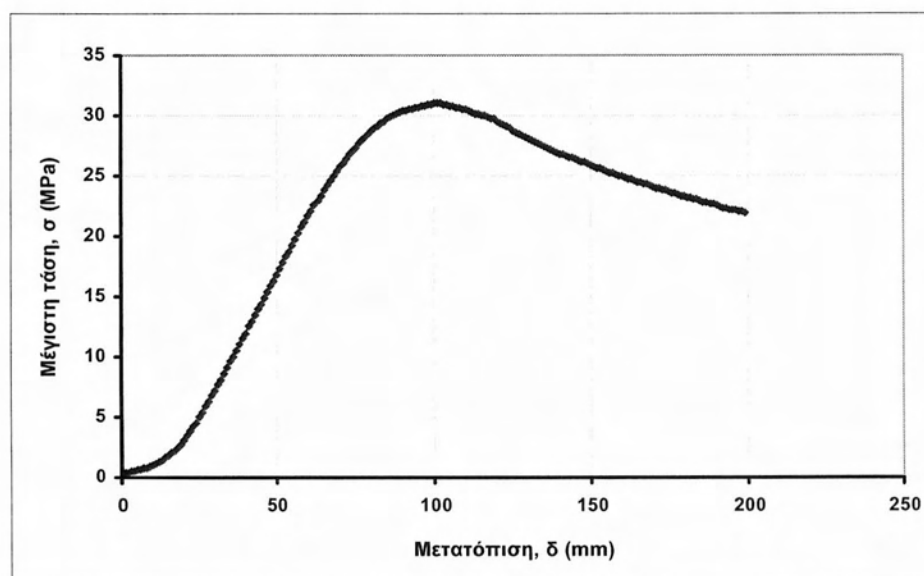
Σχήμα 2.1γ : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 09603
(ηλικία 28 ημέρες)



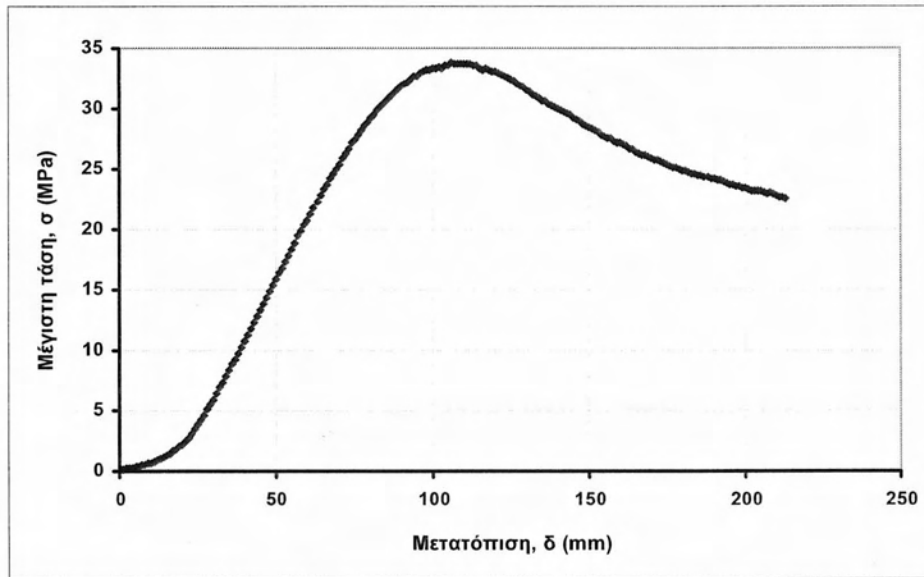
Σχήμα 2.1δ : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 09604
(ηλικία 28 ημέρες)



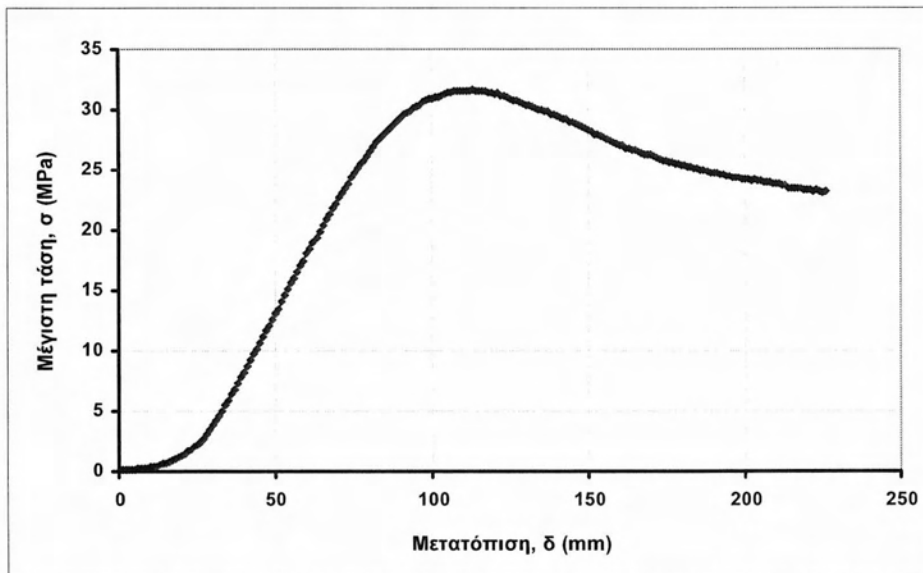
Σχήμα 2.1ε : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 096011
(ηλικία 28 ημέρες)



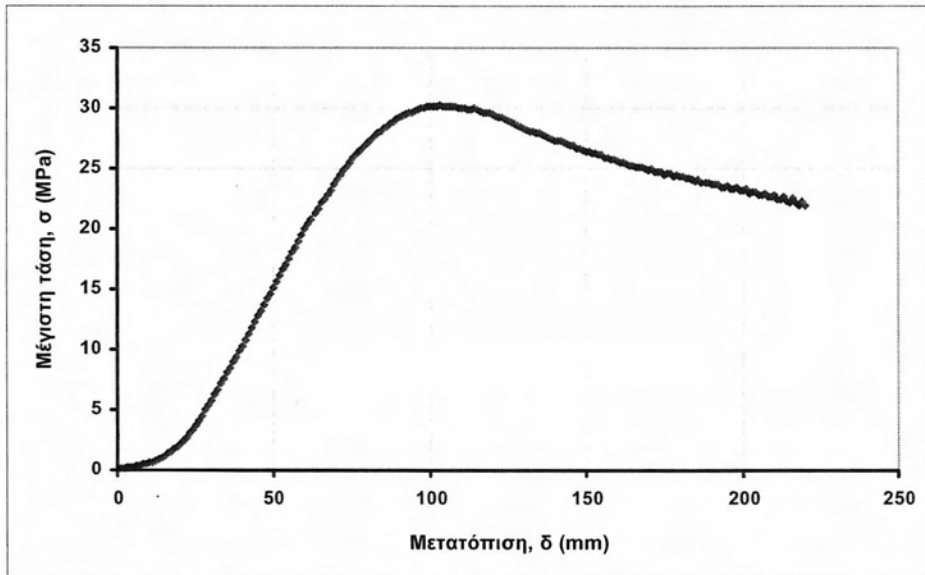
Σχήμα 2.2α : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 096012
(ηλικία 7 μήνες)



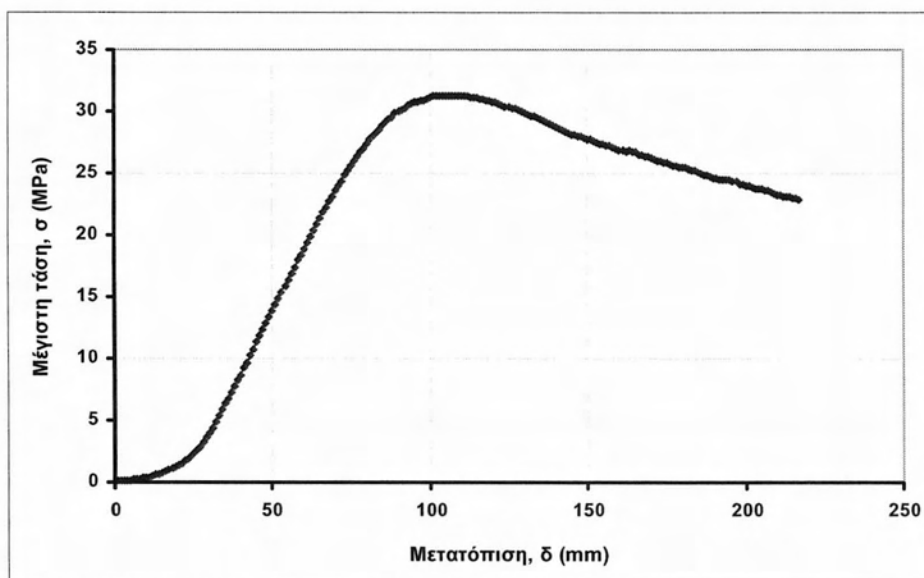
Σχήμα 2.2β : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 096013
(ηλικία 7 μήνες)



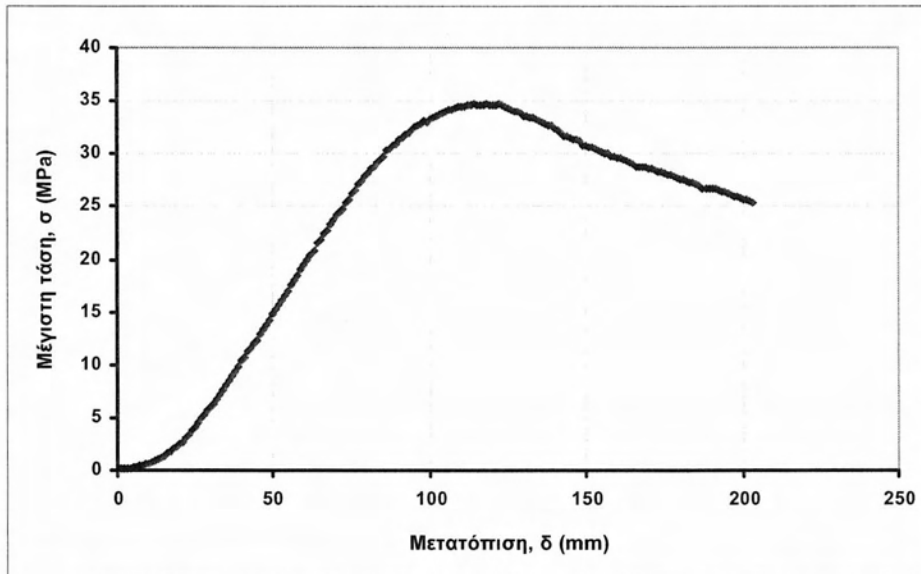
Σχήμα 2.2γ : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 096014
(ηλικία 7 μήνες)



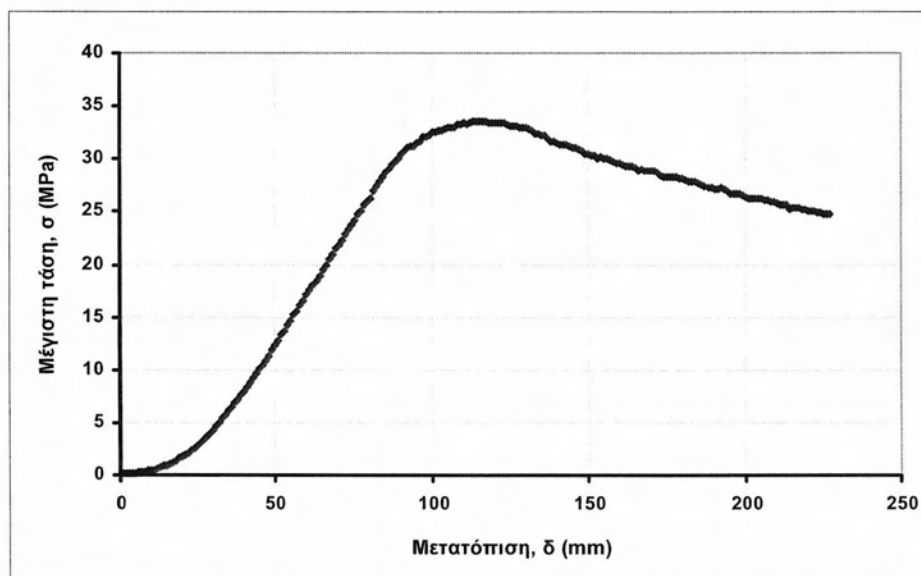
Σχήμα 2.2δ : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 096015 (ηλικία 7 μήνες)



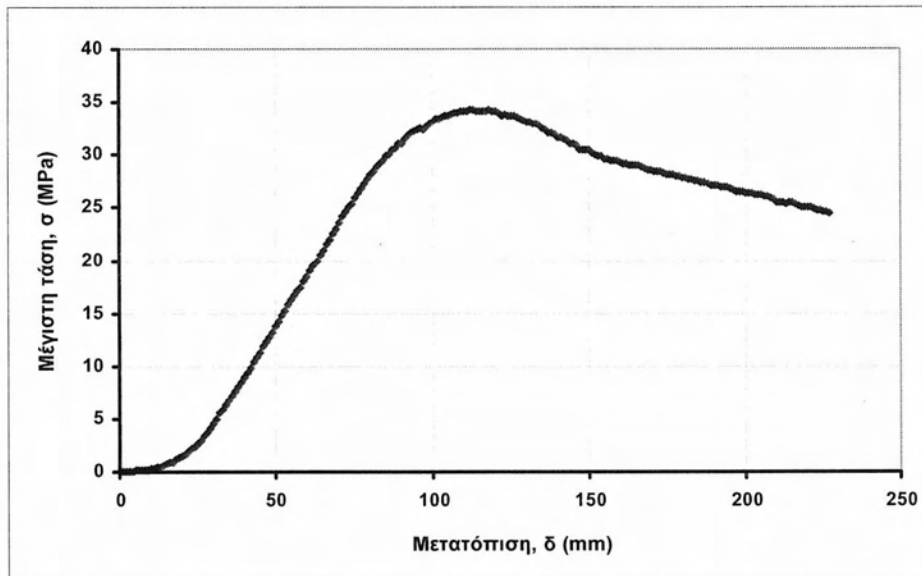
Σχήμα 2.2ε : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 096016
(ηλικία 7 μήνες)



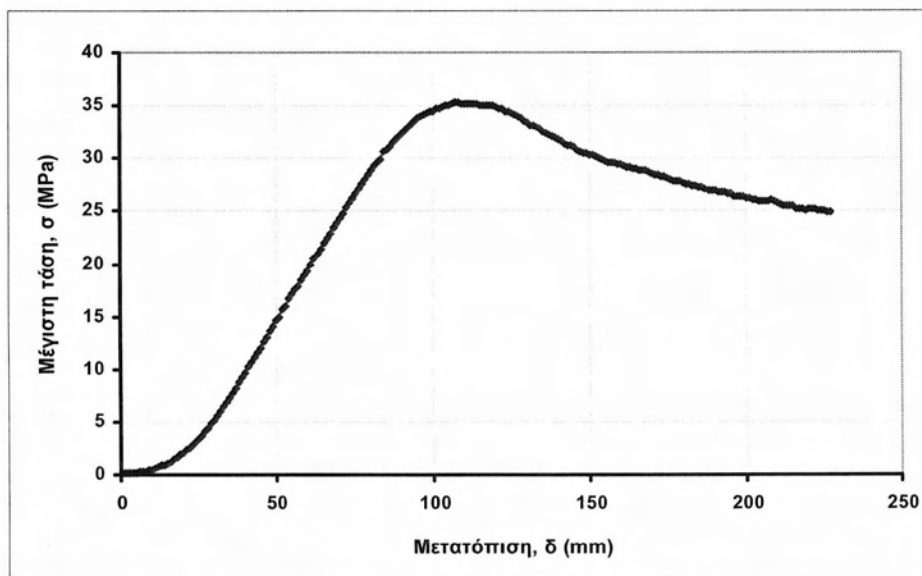
Σχήμα 2.3α : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 096005
(ηλικία 1 έτος)



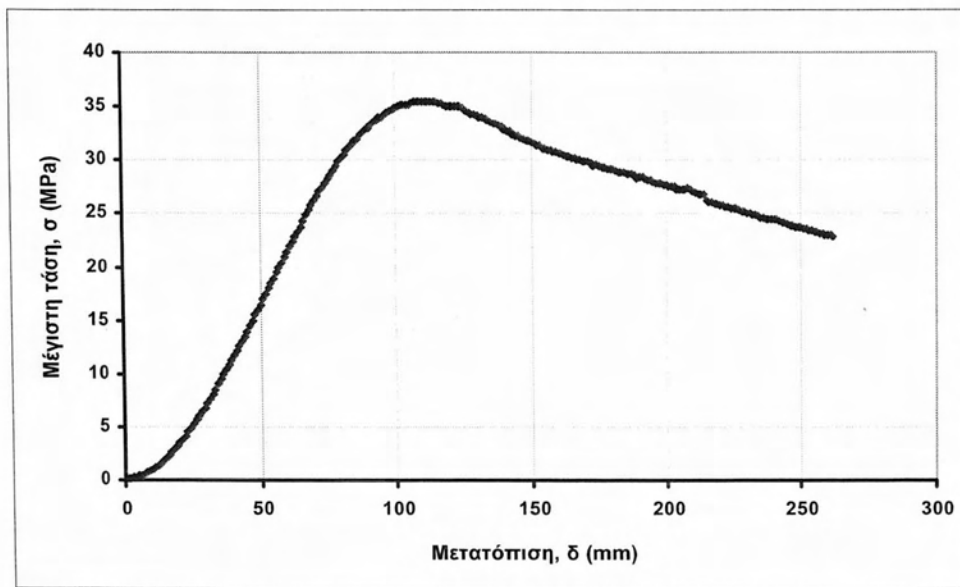
Σχήμα 2.3β : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 096006
(ηλικία 1 έτος)



Σχήμα 2.3γ : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 096008 (ηλικία 1 έτος)

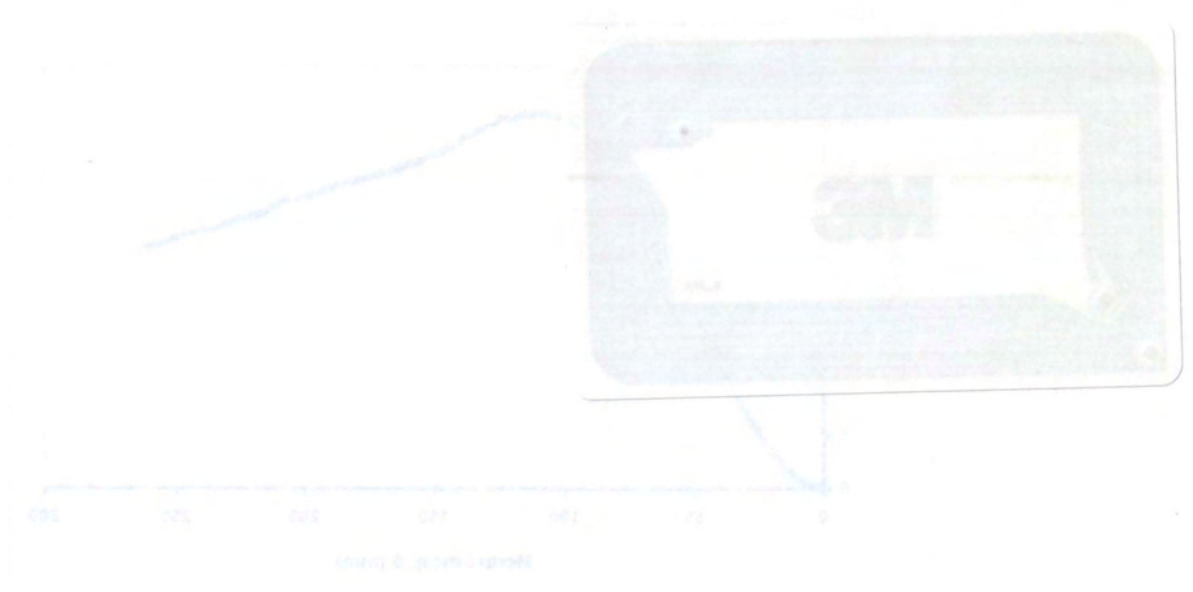


Σχήμα 2.3δ : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 096009 (ηλικία 1 έτος)



Σχήμα 2.3ε : διάγραμμα τάσης – μετατόπισης εμβόλου για δοκίμιο 096010
(ηλικία 1 έτος)





Επίπεδο και ποσοστό των ...
...



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

004000104174